



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

INGENIERIA SISMICA

POR EL PROFESOR

D. ENRIQUE ALARCON ALVAREZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Catedrático de la Escuela Técnica

Superior de Ingenieros Industriales de Madrid

DISCURSO

LEIDO EN LA SOLEMNE ENTREGA DE
LOS DIPLOMAS ACADEMICOS A LOS
INGENIEROS INDUSTRIALES DE LA
PROMOCION 134

Madrid, junio de 1991

Excmo. y Magfco. Sr. Rector,

Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades Académicas y Profesionales

Sras. y Señores.

La tradicional ambivalencia de sentimientos que sufre el profesor encargado de la lección final, entre la satisfacción por el honor que se le hace y la angustia de no defraudar la confianza en él depositada, se ve en mi caso complicada por una serie de circunstancias personales que acentúan el sentimiento de responsabilidad. Por un lado hoy se cumplen 16 años de mi incorporación como catedrático a las prestigiosas Escuelas de Ingenieros Industriales y por otro traigo el punto de vista de la especialidad de Construcción en la que debido a su venerable antigüedad puede pensarse que no queda nada por hacer.

Para combatir esa impresión en lugar de plantear una revisión histórica que me hubiese permitido reivindicar la presencia en nuestra especialidad de las mejores mentes del pensamiento racional he preferido mostrar la situación de una rama de ella, la ingeniería sísmica, en la que casi todo está por hacer.

La llamada «década para la previsión de las catástrofes naturales» ha sido lanzada precisamente para provocar la investigación y el estudio en temas cuyos efectos pueden ser devastadores y por ello esta lección pretende ser una llamada al ingenio y al trabajo de los que, entre vosotros, se sientan atraídos por el tema. Quiero también recordar que dentro de 1 año y 1 mes se celebrará en Madrid la X Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica para la que todavía estáis a tiempo de presentar ponencias.

1.1. Generalidades

El carácter más desconcertante de la acción sísmica, desde un punto de vista subjetivo, viene marcado por la alteración del equilibrio gravitatorio al que se está acostumbrado (fig. 1.1).

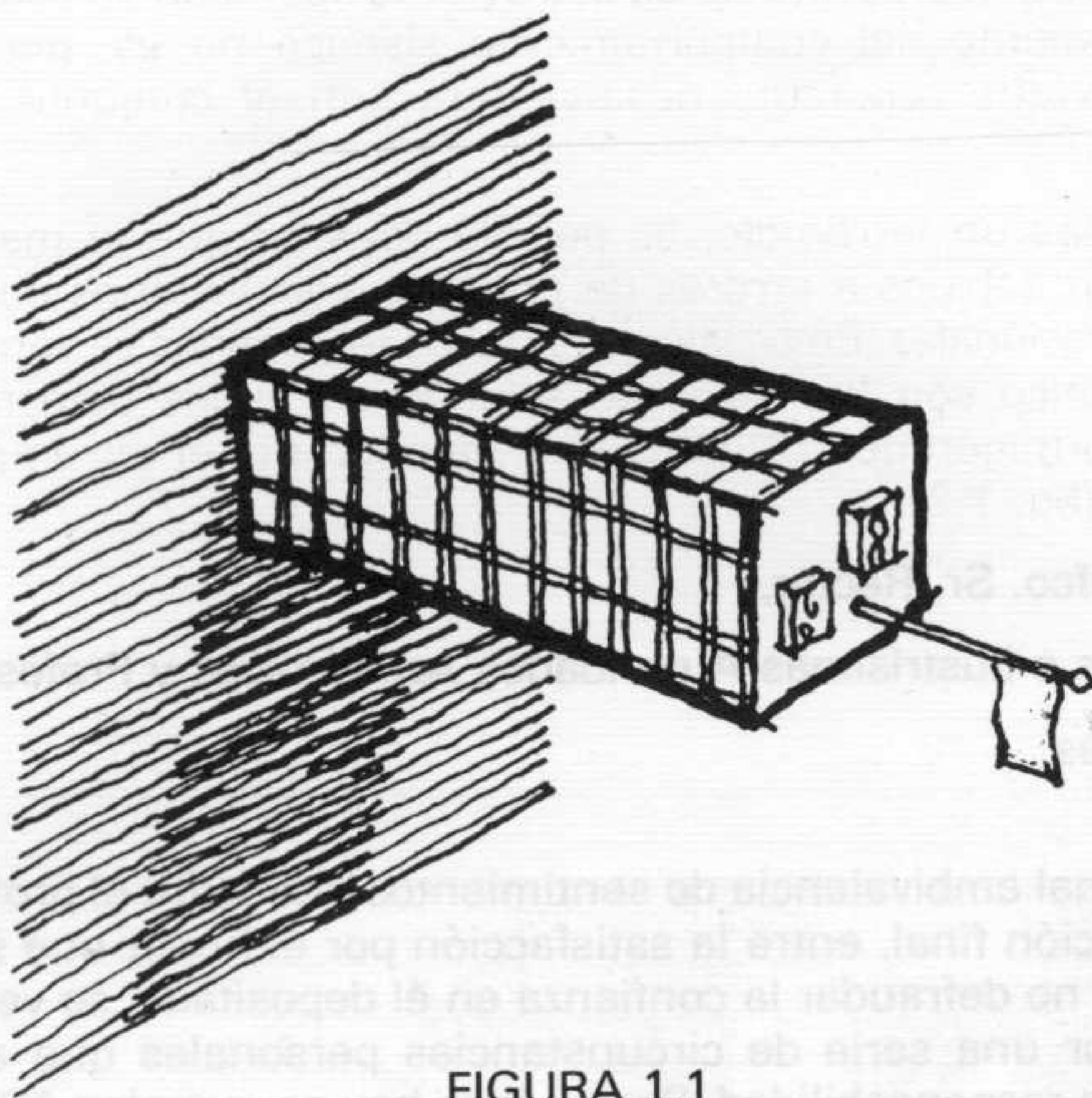


FIGURA 1.1

Alteración inesperada y a gran escala que produce los habituales estados psicológicos de impotencia y terror típicos de las catástrofes naturales.

Pese a su corta duración, la alteración de la dirección de las aceleraciones para la que están construidas las obras y en la que reposan los objetos naturales, produce roturas y accidentes que, con su secuela de muertes, afectan gravemente la organización social.

La ingeniería sísmica intenta comprender los fenómenos que se producen, el comportamiento de los materiales, la dinámica de las estructuras resistentes naturales o artificiales y, a partir del conocimiento producir proyectos que aminoren los riesgos hasta niveles admisibles por la sociedad.

Como en otros campos de la ingeniería el avance se ha producido tras una serie de accidentes que han provocado la reflexión sobre las medidas preventivas. En los últimos 30 años se ha producido además un impulso,

originado en los progresos de la sismología y en el desarrollo de las computadoras, que ha permitido el análisis de sistemas muy complejos ante acciones semejantes a las reales. Sin embargo, la industria de la construcción típicamente conservadora, no ha incorporado de manera rutinaria el cúmulo de conocimientos que se han producido.

Conviene observar que la ingeniería sísmica es globalizadora en el sentido que todos los problemas que puedan plantearse sobre comportamiento de materiales, cálculo y proyecto de estructuras aparecen en ella. El progreso en el conocimiento del comportamiento sísmico no es, pues, un tema marginal sino que repercute positivamente en el conjunto del arte de construir.

Por ello, tras un terremoto, es posible detectar que la mayoría de los accidentes son debidos a errores de proyecto y violaciones de las normas constructivas racionales. En ocasiones algunos fenómenos se ven acentuados; un ejemplo típico son los fallos de armado de nudos detectados en los pórticos de hormigón de la Nimitz Freeway durante el terremoto de Loma Prieta (1989) (fig. 1.2).



FIGURA 1.2

Otras veces fenómenos estáticos conocidos presentan variantes dinámicas espectaculares como los casos de sifonamiento por licuación del terreno producidos en el terremoto de Niigata (1964) (fig. 1.3),



FIGURA 1.3

o se excitan nuevas acciones como el oleaje en los depósitos (fig. 1.4A) y los maremotos o tsunamis con efectos devastadores (fig. 1.4B).

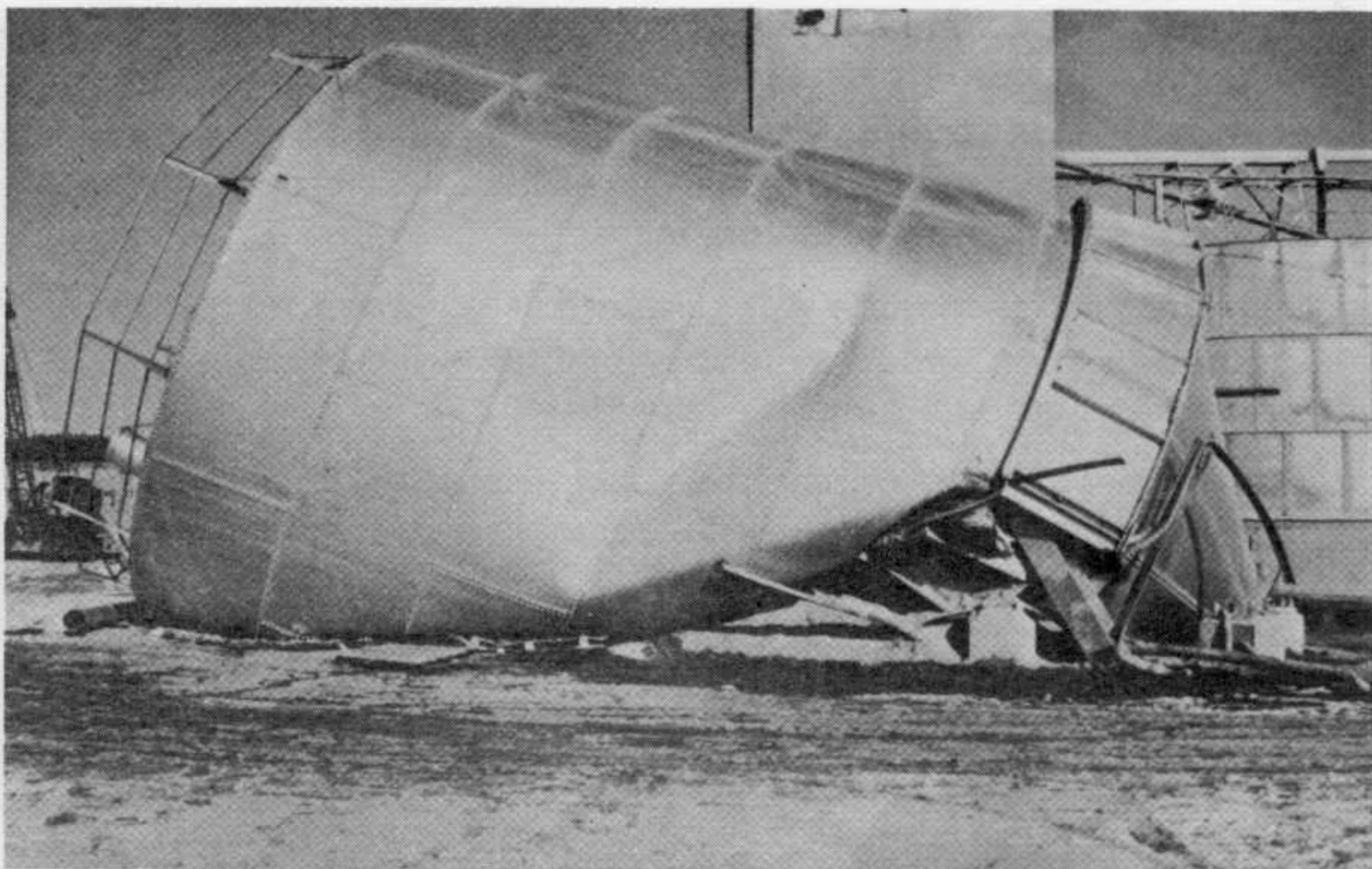


FIGURA 1.4 A y B

1.2. Lecciones y problemas planteados por algunos terremotos famosos

El origen de los terremotos es variado, se habla de los relacionados con los volcanes, con hundimientos de cavernas, etc. pero los terremotos más destructivos son de origen tectónico.

Una fractura se desata súbitamente y progresa en un área de falla liberando una energía que se propaga como ondas y sus correspondientes aceleraciones que hacen oscilar las estructuras.

Tras el movimiento principal es corriente la aparición de *réplicas* que están posiblemente ligadas a la readaptación de tensiones. Son famosas las réplicas del terremoto de New Madrid (EEUU, 1811) que duraron casi un año, o las del de Mino-Owari (Japón, 1891) que, en 14 meses, presentó alrededor de 3.000 réplicas.

Otros terremotos son precedidos por movimientos *precursores* como los de Agadir (Marruecos) o Chile de 1960.

El arranque de las ideas actuales sobre el origen de los terremotos se remonta a la *teoría del rebote elástico* propuesta por Reid tras el de San Francisco de 1906.

Precisamente el citado terremoto es clásico en la ingeniería sísmica, no sólo por haber puesto de manifiesto la relación entre terremoto y falla sino por dos circunstancias que se han repetido periódicamente: los *incendios* desatados y la imposibilidad de su control por *rotura de las conducciones* de agua y los *hundimientos* de estructuras en zonas con *relleno sin consolidar*.

Como es sabido los incendios tardaron en controlarse días y ello pese a la voladura de bloques enteros de edificios en un intento desesperado por crear cortafuegos (fig. 1.5).



FIGURA 1.5

La rotura de conducciones se ha repetido una y otra vez, incluido el terremoto de Loma Prieta y pese a ello es un hecho, desgraciadamente universal, que las conducciones no son estudiadas en el contexto sismorresistente, pese a su carácter vital en los momentos posteriores al sismo.

Por otro lado, como es sabido, numerosas zonas de San Francisco se han obtenido rellenando desniveles de terreno. Ello es notable en la zona llamada de la Marina, donde un relleno sin consolidar, al borde del mar, se encuentra completamente saturado. Las sacudidas producen en estas zonas fenómenos de licuación con roturas espectaculares (fig. 1.6) y los típicos flujos de arena a través de grietas en el terreno.



FIGURA 1.6

El estudio sistemático de los *fenómenos de licuación* fue, sin embargo, impulsado por dos terremotos famosos en la literatura técnica: los de Niigata (1964) y Alaska (1964). Los espectaculares resultados de la anulación de las tensiones efectivas en un suelo granular saturado pueden verse en la figura 1.7 correspondiente al hundimiento por vuelco de bloques de viviendas con una estructura muy rígida mientras que la figura 1.8 presenta el desolado panorama de Anchorage donde se estima que unos 260.000 km² se vieron afectados por alteraciones topográficas.



FIGURA 1.7

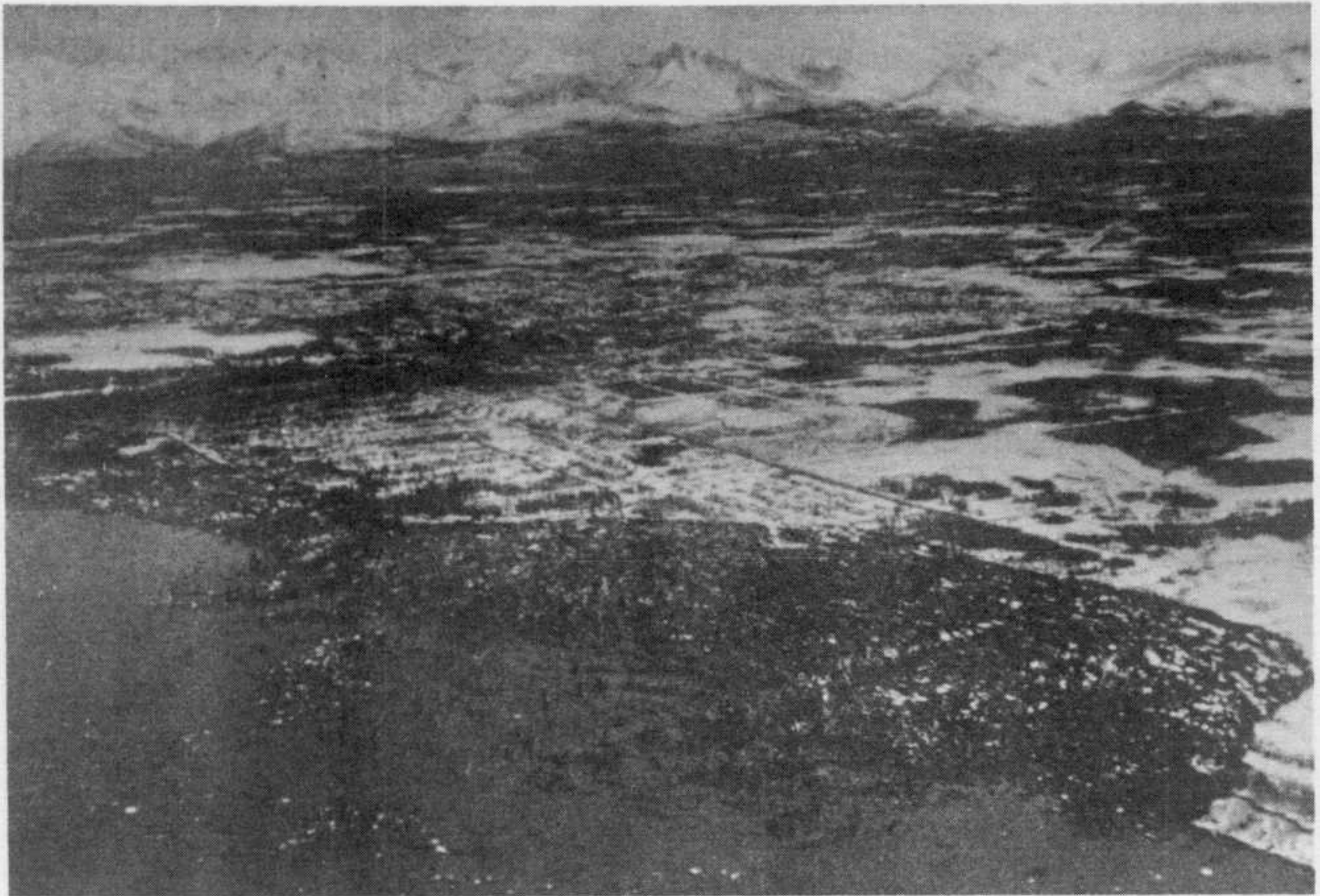
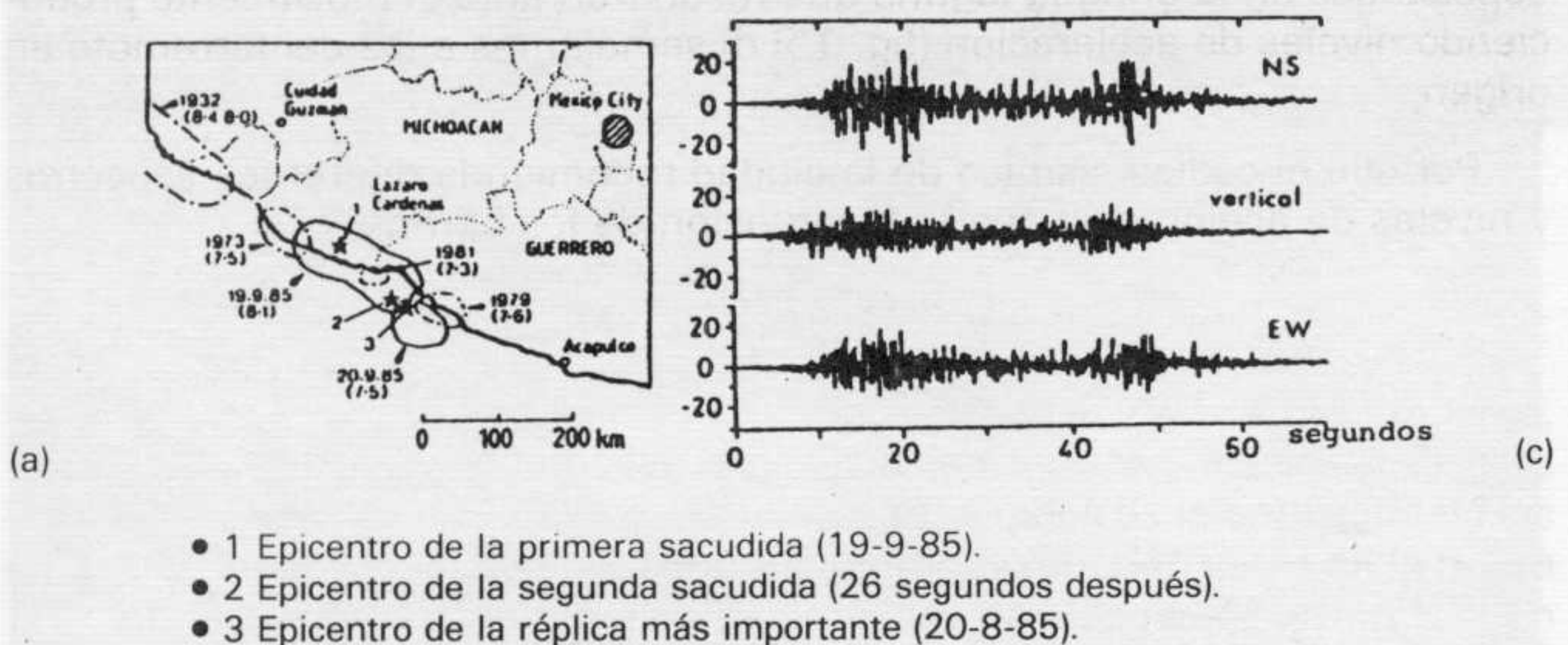


FIGURA 1.8

La importancia que tiene la *estratificación del suelo* en la respuesta dinámica de los edificios sobre ella cimentados fue puesta de manifiesto una vez más, y de forma bien dramática, en el terremoto de México de 1985, 180 edificios se hundieron por completo, 100 tuvieron que ser demolidos y alrededor de 1.000 requirieron importantes inversiones para su reparación.

La figura 1.9 a) indica el lugar del epicentro, en una zona donde ya se habían producido otros movimientos.

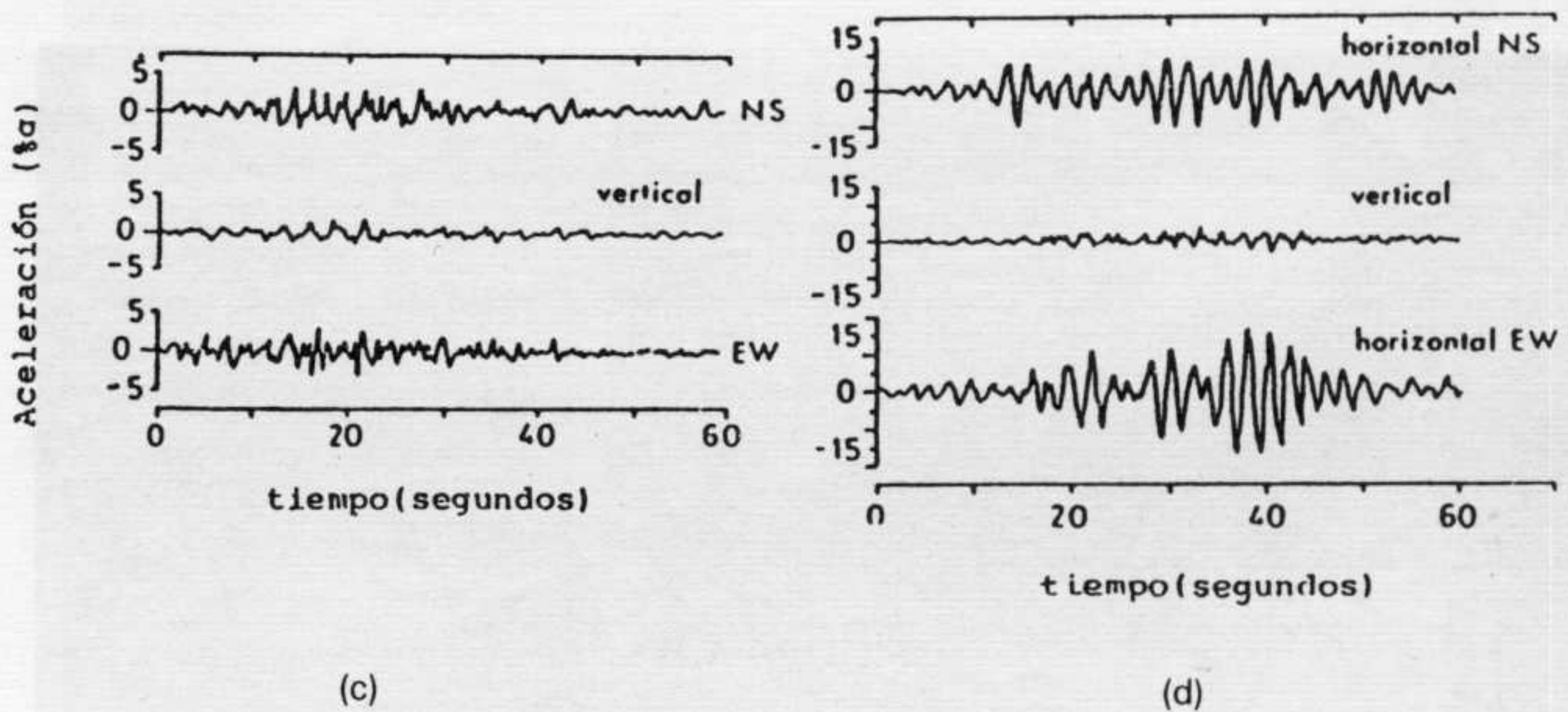


Zonas de rotura del terremoto de México de 19 de septiembre de 1985.

FIGURA 1.9 a), b)

Como puede verse, ciudad de México está a unos 400 km de distancia de modo que podría pensarse que el movimiento en la costa (fig. 1.9 b) se amortiguaría.

De hecho es así si se considera el acelera acelerograma (fig. 1.9 c) registrado sobre roca.



Acelerogramas del terremoto de Michoacán. México, 19-9-85, registrados en estación de la UNAM sobre roca; b) estación saturada en la zona de la antigua laguna.

FIGURA 1.9 c), d)

Sin embargo, existen áreas de la ciudad construidas sobre sedimentos depositados en la antigua laguna que resonaron ante el movimiento produciendo niveles de aceleración (fig. 1.9 d) semejantes a los del terremoto en origen.

Por ello el código sísmico de la ciudad recomienda diferentes espectros y niveles de aceleración según la situación de los barrios.

La definición de la acción sísmica debe tener en cuenta la posible alteración del movimiento por estos depósitos de suelo y el terremoto de México lo puso claramente de manifiesto. La destrucción (fig. 1.10) tuvo además otros orígenes relacionados con la *calidad de la construcción* y con la *falta de ductilidad* de las estructuras de hormigón calculadas, pero no proyectadas, confiando en elevadas capacidades de plastificación. Ambos temas pueden ser igualmente ilustrados con sendos terremotos.



FIGURA 1.10

La mala calidad de la construcción provocada por un desarrollo especulativo basado en el turismo es una de las causas por las que el terremoto de Agadir (1960) de muy bajo nivel, provocó la muerte a casi un 50 % de su población (fig. 1.11); el terremoto era muy superficial y se produjo prácticamente bajo la ciudad pero la mayoría de las construcciones carecían de resistencia frente a cargas horizontales.



FIGURA 1.11 a)



FIGURA 1.11 b)

El tema de la calidad de la construcción es el factor definitivo al evaluar la posibilidad de daños. El terremoto de Irán de 1990 es una prueba adicional de un estudio clásico de Bath que define la destrucción específica mediante la expresión

$$f = \lg_{10} \left[\frac{C (N+1)}{E} \right] \quad \dots 2 (1)$$

donde N es el número de víctimas, E la energía de las ondas sísmicas y C una constante. La tabla I recoge la destrucción específica media para las regiones sísmicas más activas del globo. Como puede observarse son las zonas con una calidad media de construcción más baja las que presentan un valor más acusado de f.

Tabla I

Región	f medio
Mediterránea	6,3
Irán-Pakistán-Afganistán	6,0
Asia Central	4,8
Sudamérica	4,7
Japón-Formosa	4,6
India	4,3
Nueva Zelanda	3,3
Norteamérica	2,8

Respecto a la importancia que tiene cuidar el armado en estructuras de hormigón para obtener una buena *ductilidad* ante esfuerzos alternativos, cabría citar el terremoto de San Fernando (1971).

La figura 12 recoge el estado en que quedaron dos columnas de la planta baja del Olive View Hospital. En la figura 1.12 a) se observa la destrucción total en un pilar armado ligeramente con cercos, mientras la 12 b) muestra el comportamiento dúctil de una columna con el núcleo confinado con un armado espiral denso.

El terremoto de San Fernando puso también de manifiesto la fragilidad de *los puentes de carretera* ante la acción sísmica (fig. 13) que, al caer, dejaron de cumplir su fundamental misión de comunicación para el escape o la llegada de ayuda en el momento más grave.

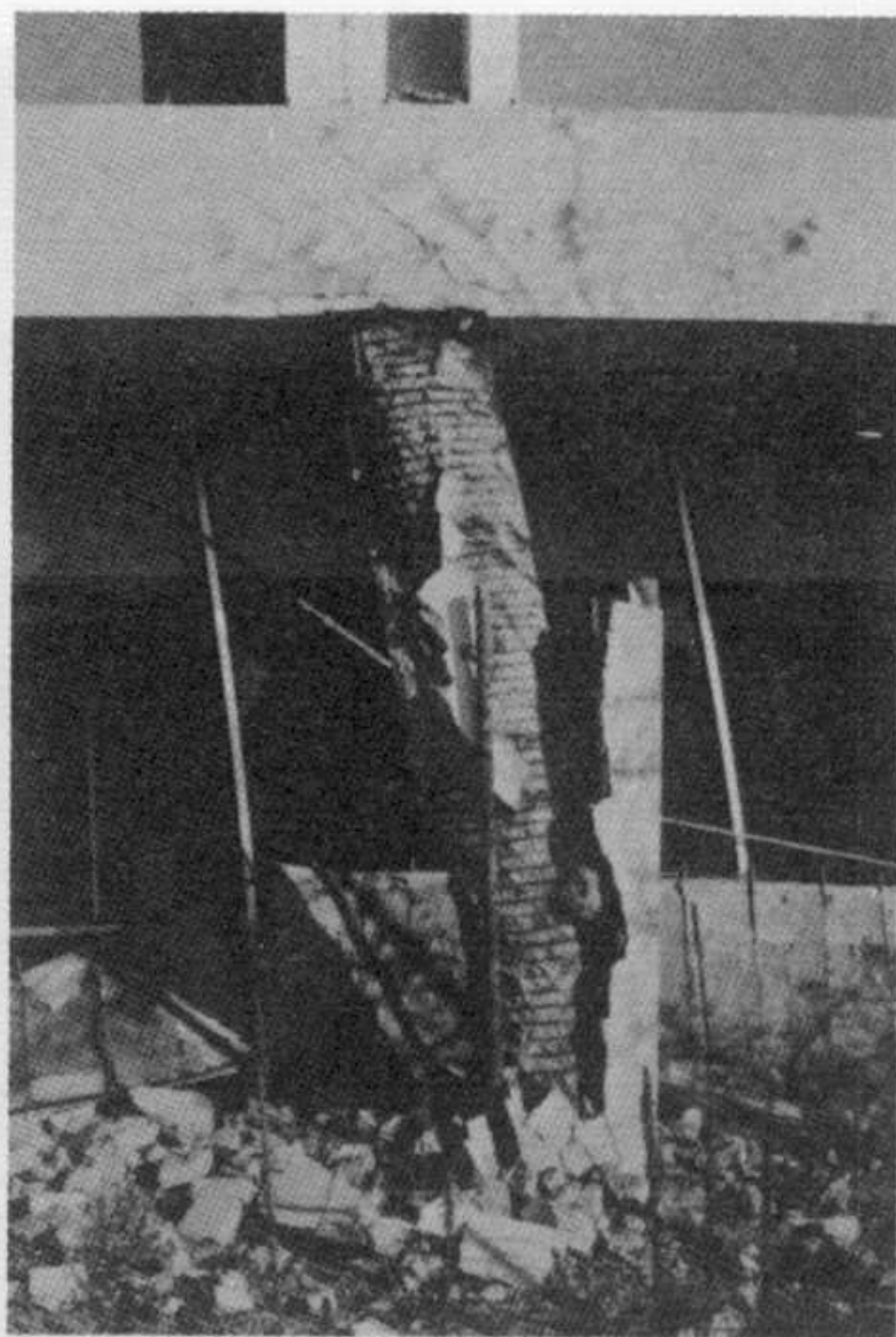
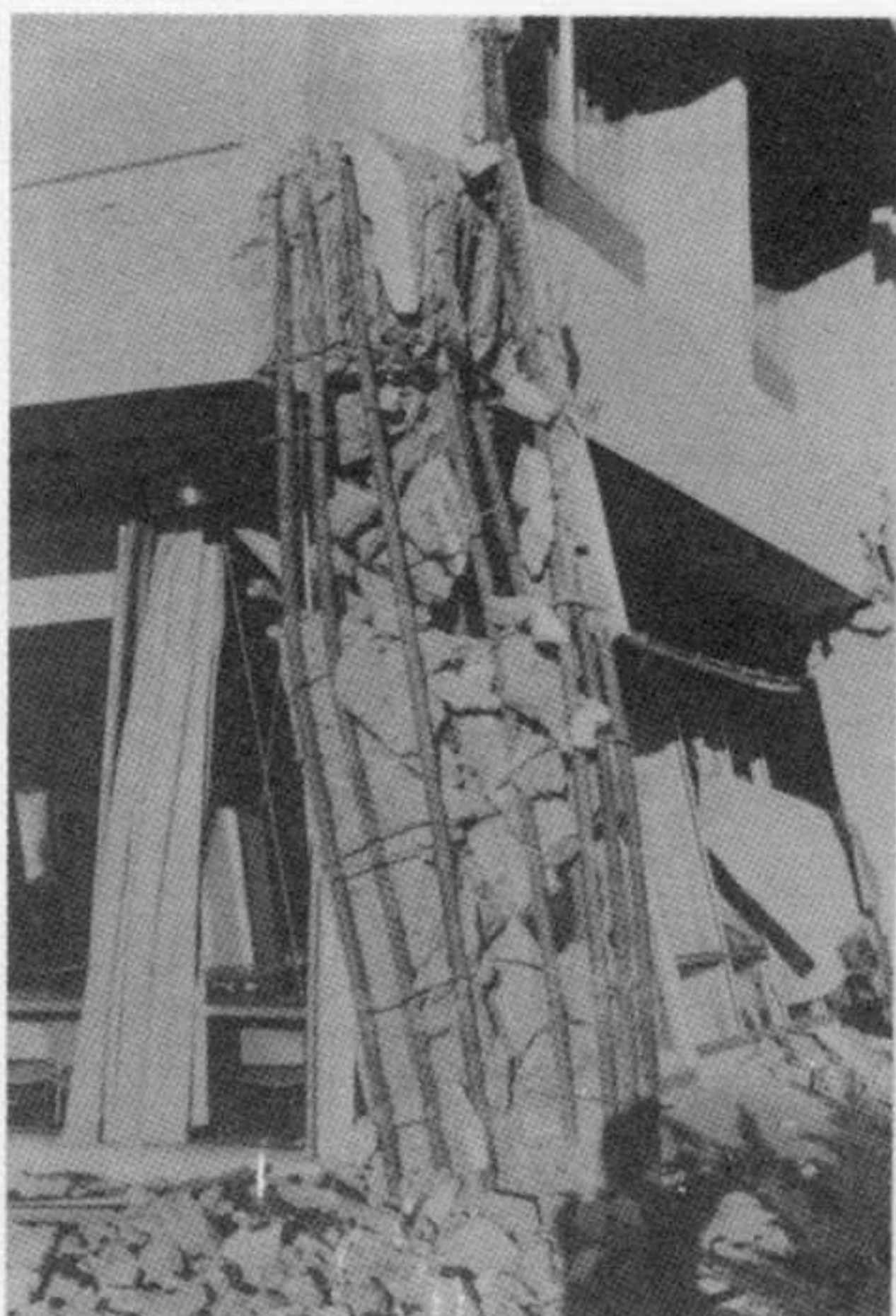


FIGURA 1.12 a), b)



FIGURA 1.13 a)

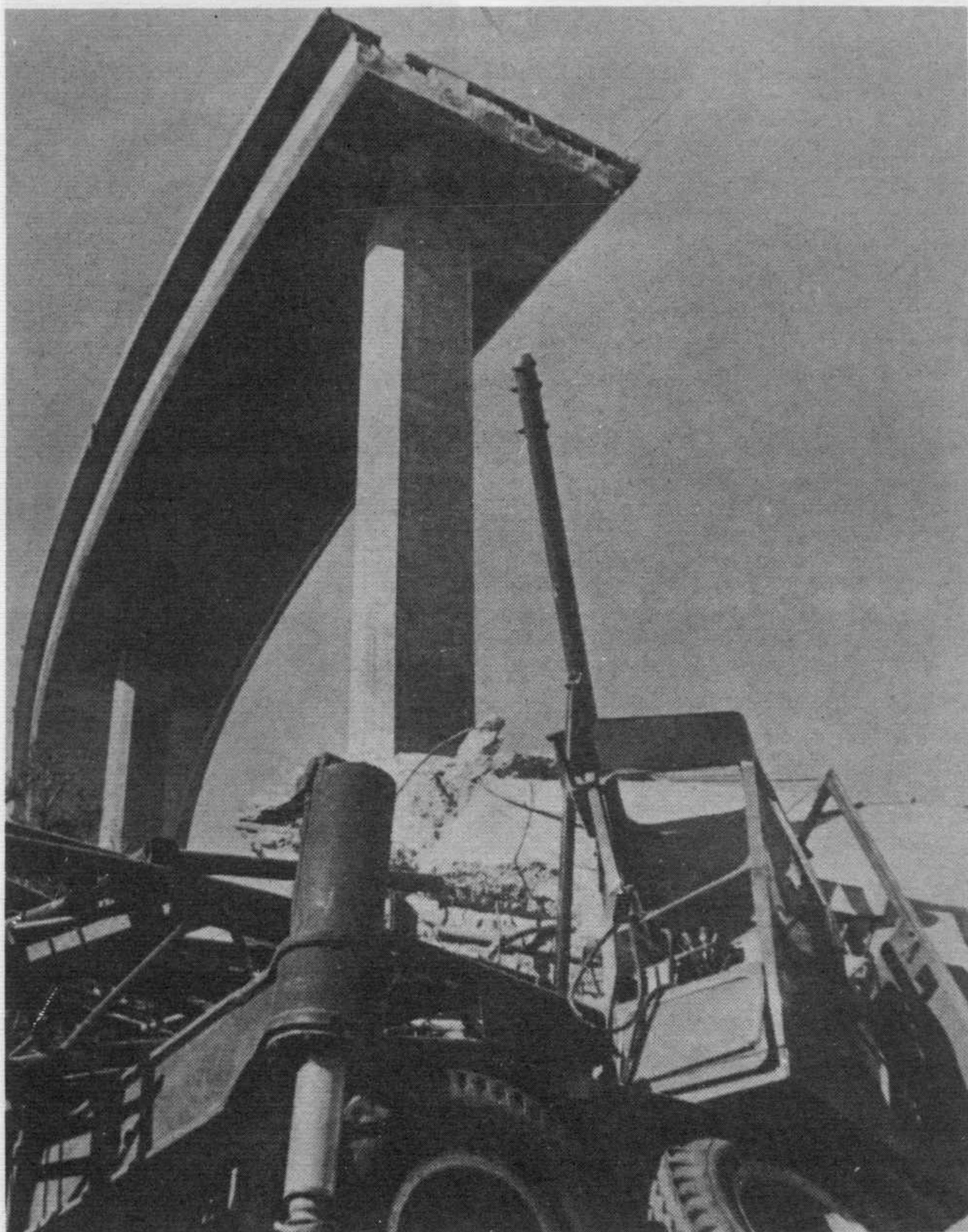


FIGURA 1.13 b)

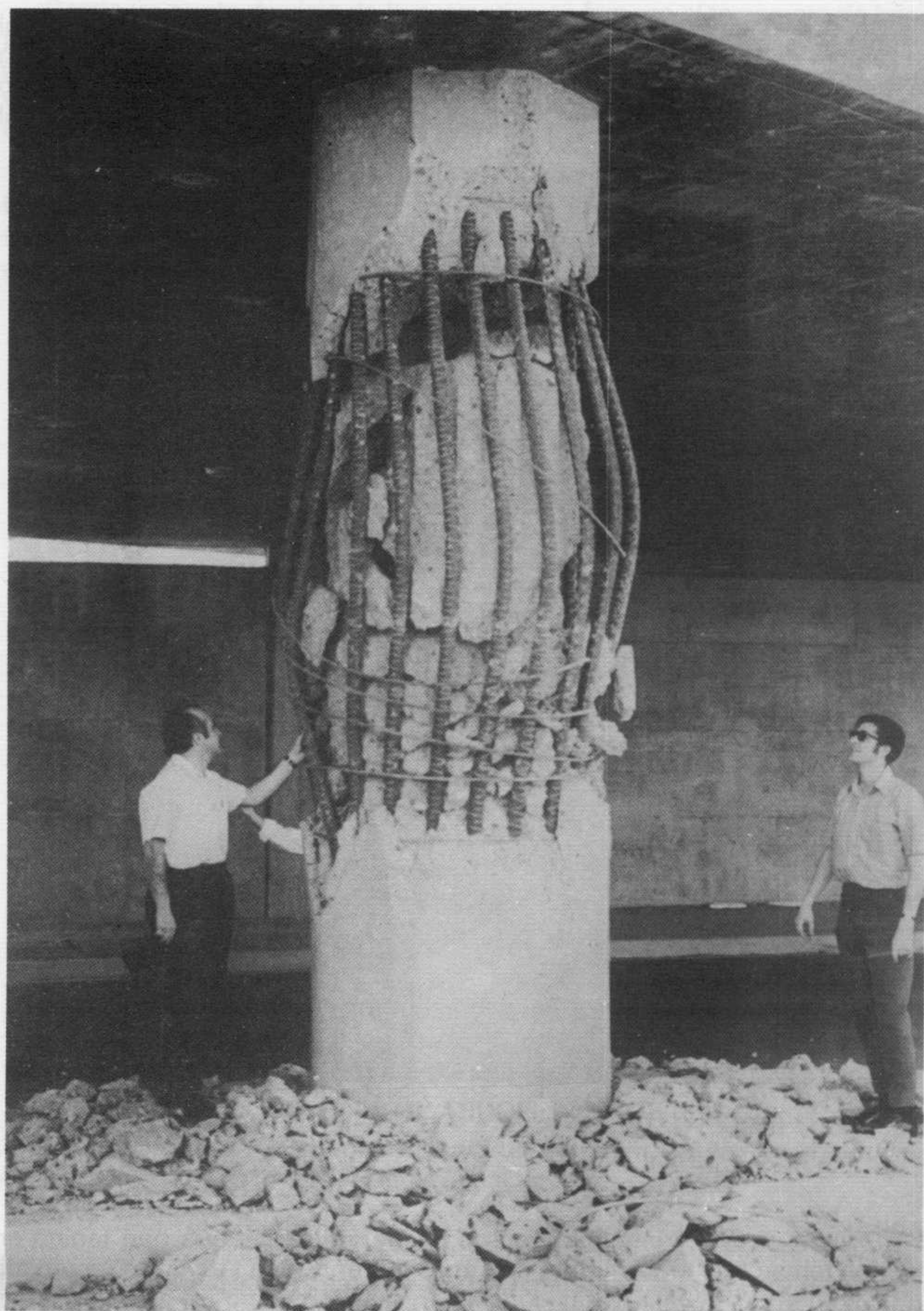


FIGURA 1.13 c)

De nuevo se trata de un tema recurrente como se ha visto en el terremoto de Loma Prieta donde, o bien un fallo de armado (fig. 1.2) o bien la insuficiencia de la longitud de apoyo (fig. 1.14) han provocado el colapso de tramos con la consiguiente pérdida de vidas humanas y distorsiones del tráfico.



FIGURA 1.14

Existen otros terremotos famosos por la influencia que han tenido en ciertos temas. Así el terremoto de Tangshan en China (1979) es recordado no sólo por sus devastadoras consecuencias sino como un ejemplo de las posibilidades de predicción ayudadas en este caso por una organización social que hizo posible la evacuación de poblaciones consideradas críticas con lo que se disminuyó el número de accidentados.

Desde un punto de vista de la normativa es famoso el terremoto de Long Beach (1933) que produjo el derrumbamiento de numerosas escuelas (vacías dada la hora de ocurrencia aproximadamente 6 tarde) y con ello la voluntad de desarrollar una norma sismorresistente (la Field Act) para California que, en sus sucesivas variantes, fue seguida por otras posibles.

Muy citado es también el terremoto de El Centro (1940); lo que lo hizo famoso fue su acelerograma (fig. 1.15), uno de los primeros recogidos y con una aceleración notable, que todavía es utilizado en algunos estudios de estructuras.

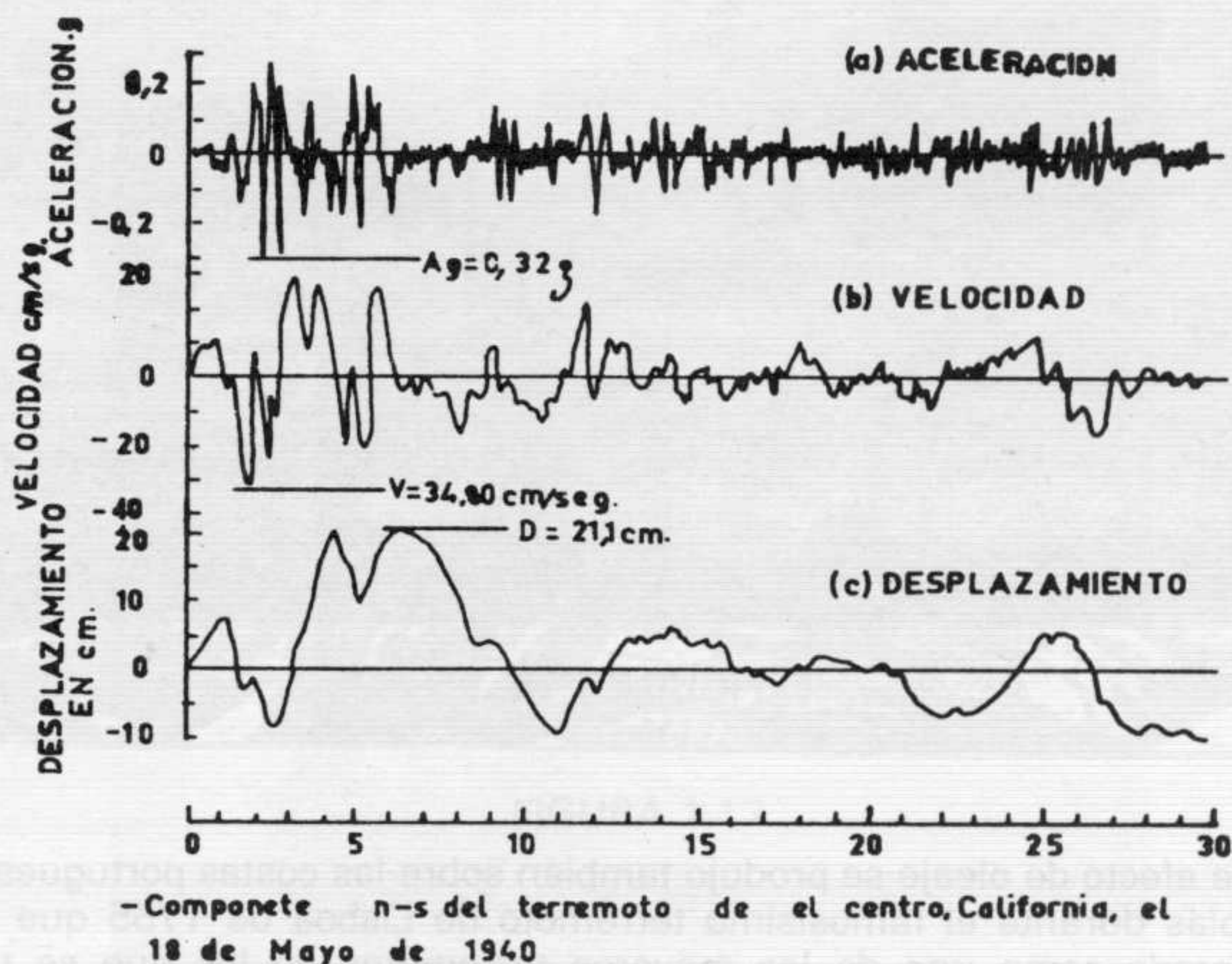


FIGURA 1.15

A la misma época pertenecen los de Olimpia (1949) y Taft (1952) que fueron tratados por Housner para construir el primer *espectro de respuesta medio* correspondiente a terremotos reales.

En ocasiones la magnitud del movimiento supera los límites de duración, unas decenas de segundos, que se estiman habitualmente. Así en 1960 Chile fue sometida a 5 terremotos con una magnitud superior a 7, en menos de 2 días. Este terremoto es famoso por dos motivos el *maremoto* provocado por el movimiento y las *oscilaciones de la tierra* como cuerpo elástico que duraron casi un mes y permitieron comprobar la teoría de Love que

estimaba el período fundamental de vibración de la esfera terrestre en unos 60 minutos.

El maremoto (o tsunami) tuvo efectos devastadores en la costa chilena donde se registraron olas sucesivas de hasta 6 m de altura, pero se transmitió a Hawaii y Japón. La figura 1.16 muestra como ola ola en Ofunato (Japón) elevó los barcos pesqueros sobre un muelle situado a 2,5 m sobre el nivel del mar y los arrastró a 50 m hacia el interior de la ciudad.



FIGURA 1.16

Este efecto de oleaje se produjo también sobre las costas portuguesas y españolas durante el famosísimo terremoto de Lisboa de 1755 que está considerado como uno de los mayores terremotos de los que se tiene noticia. (Algunos autores le asignan una magnitud próxima a 9). La cuarta parte de los habitantes de Lisboa murieron en 6 minutos dándose la circunstancia que, al ser 1 de noviembre, día de Todos los Santos, gran parte de ellos fueron sepultados en el hundimiento en las iglesias donde se encontraban. Un nuevo muelle de mármol, lleno de personas que habían huido de la ciudad fue arrastrado y hundido por el tsunami posterior. El terremoto se sintió en toda España, en El Cairo, Escandinavia, Islas Británicas, Suiza, etc. Dando lugar a oscilaciones del agua en lagos (seiches). Por ejemplo se asegura que en Loch Lomond en Escocia el agua subió 70 cm.

El terremoto de Lisboa motivó un profundo interés científico y debe recordar permanentemente la sismicidad de la Península Ibérica, la importancia de los sismos lejanos y el riesgo de maremotos en nuestras costas del sur.

Finalmente y como ejemplo de lo que puede ser un terremoto catastrófico en Andalucía se recuerda el sismo de 1884 que ha servido de base para estudios recientes de riesgo (Martín, 1981) y que fue por estudiado por diferentes comisiones internacionales. La figura 1.17 recoge los destrozos ocasionados en Ventas de Zafarraya en las proximidades de Granada.

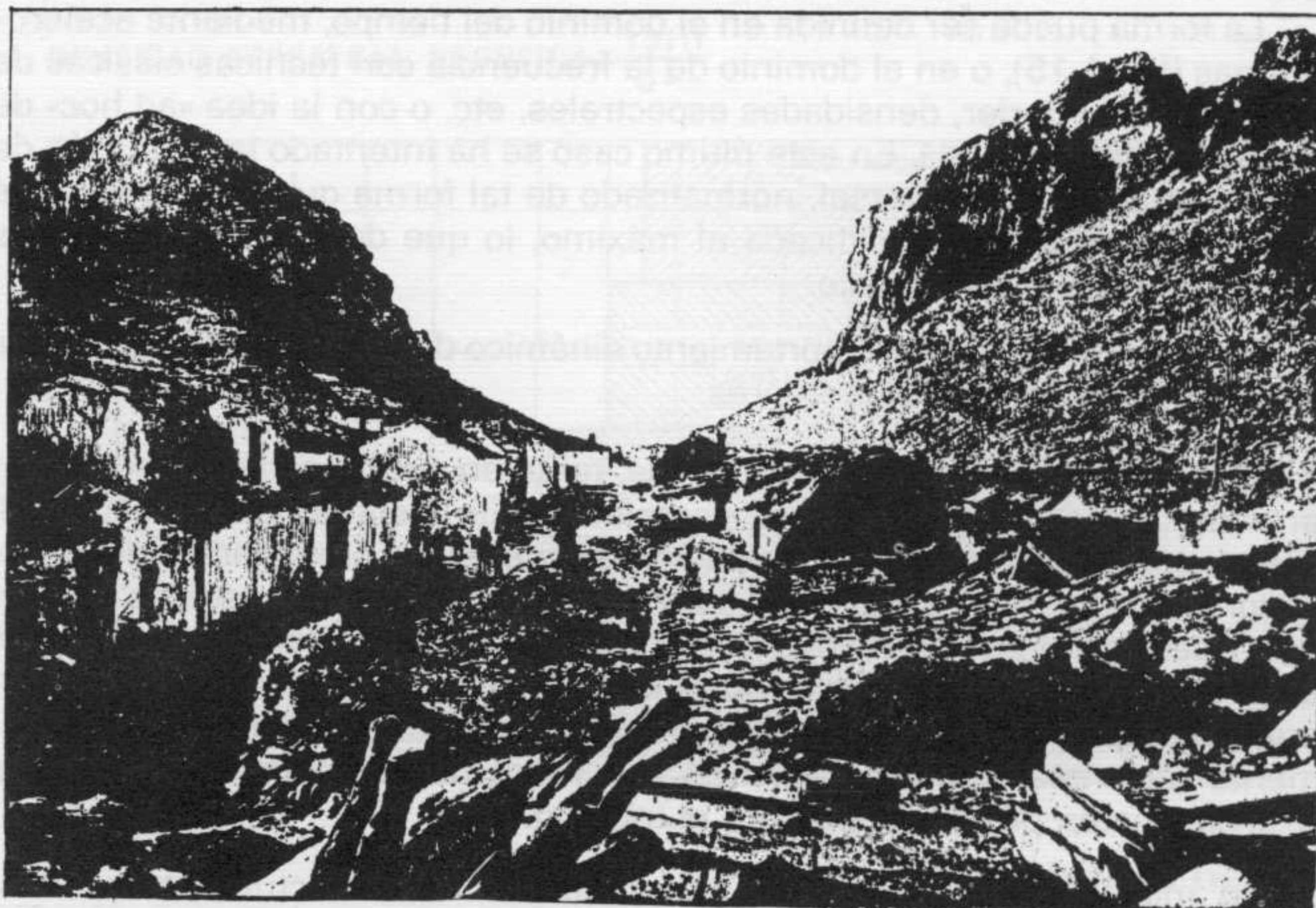


FIGURA 1.17

1.3. Algunos temas de estudio típicos de la ingeniería sísmica

De la descripción somera realizada en el apartado anterior cabe deducir la gran cantidad de aspectos que deben tratarse al realizar un estudio sísmico. Ello queda reflejado en la inmensa cantidad de documentación disponible sobre temas parciales y la dificultad para su asimilación («ahitos de información y ayunos de sabiduría» sería la situación según D. Key).

Los grupos más interesantes de temas se refieren, desde el punto de vista del ingeniero, a la definición de la acción sísmica; a la comprensión del comportamiento dinámico de estructuras y materiales; al diseño de formas y detalles constructivos favorables para la supervivencia de estructuras ante sismos y, finalmente, a la codificación de todo ese conocimiento y experiencias en Normas de aplicación para la industria de la Construcción.

Como se verá la definición de la acción incluye en primer lugar la zonificación del territorio y el estudio del riesgo sísmico según niveles generales, como la magnitud, la intensidad, o la máxima aceleración esperable en el emplazamiento. No obstante se precisan definiciones adicionales como la duración o la forma del movimiento que pueden tener influencia decisiva en el comportamiento no lineal de estructuras y materiales.

La forma puede ser definida en el dominio del tiempo, mediante acelerogramas (fig. 1.15), o en el dominio de la frecuencia con técnicas clásicas de espectros de Fourier, densidades espectrales, etc. o con la idea «ad hoc» de espectros de respuesta. En este último caso se ha intentado la definición de un espectro medio universal, normalizado de tal forma que la definición de la acción pueda ser simplificada al máximo, lo que da lugar a numerosos temas de reflexión y estudio.

La comprensión del comportamiento dinámico de estructuras y materiales es igualmente otro foco de interés.

La carga cíclica ocasiona problemas, tanto en suelos como en hormigón armado, aceros, albañilería, etc. completamente distintas de las estáticas. Temas como la capacidad de disipación de energía, la propagación del daño, el comportamiento dúctil o frágil, tanto en servicio como en estados últimos sólo pueden ser comprendidos tras la experiencia de terremotos anteriores o de ensayos con plataforma vibratoria. El coste del conocimiento es, en cualquier caso, muy elevado y requiere tiempo; algunos desarrollos relativamente recientes como los ensayos con muro de reacción muestran que todavía existen posibilidades para el ingenio.

Lo mismo sucede con el comportamiento de estructuras completas. Incluso en régimen lineal y elástico el análisis de estructuras con un nivel moderado de complicación conduce muchas veces a conclusiones difícilmente predecibles desde la formación ingenieril habitualmente «estática». Tanto los modelos numéricos como los métodos de cálculo, deterministas y probabilistas, están sufriendo una evolución continua pese al alto nivel de sofisticación ya alcanzado. En algunos casos se han desarrollado vigorosas ideas, como el llamado «diseño basado en capacidad», que reúnen características de análisis, predicción y estructuración del esquema resistente en sentido de facilitar el proyecto racional y plantear una base, igualmente racional, para el diseño de los detalles constructivos.

Finalmente el legislador debe resumir la experiencia en Normas constructivas que, estableciendo exigencias mínimas de obligado cumplimiento, permitan garantizar un nivel de seguridad comparable al obtenido con otras acciones.

La legislación sismorresistente es relativamente reciente. En principio se pensaba que una estructura diseñada para resistir viento sería igualmente adecuada para sismos. La figura 18 pone de manifiesto que el contenido de

frecuencias de ambas solicitaciones es completamente distinto, y por ello las Normas pasaron de imponer una carga fija, independientemente de las características dinámicas de la estructura, por ejemplo el 10 % del peso, a establecer fórmulas variables con la frecuencia.

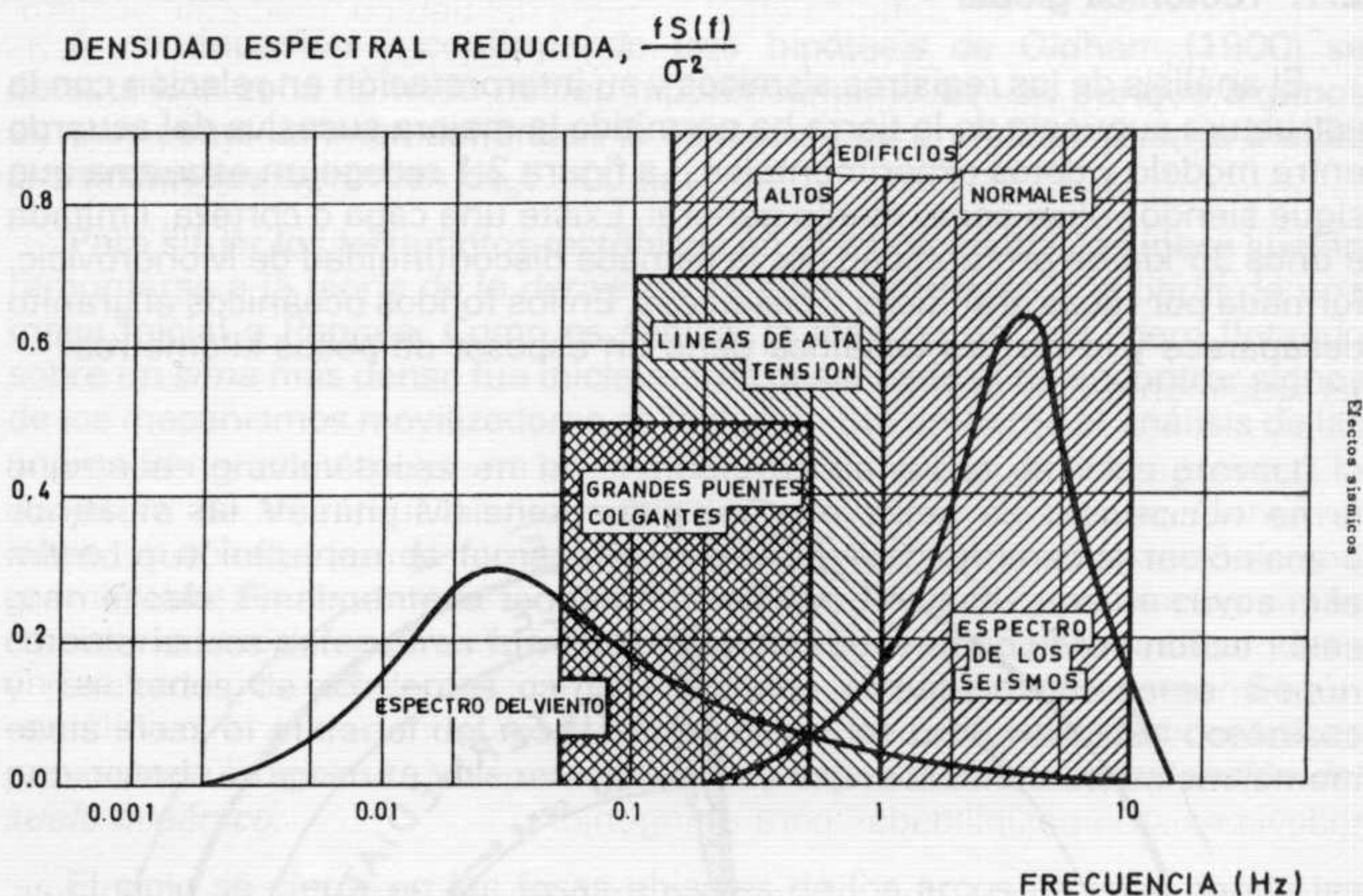


FIGURA 1.18

Ejemplo del primer caso era el «Building Code of the city of Los Angeles» de 1933 establecido tras el citado terremoto de Long Beach que en 1943 fue modificado para introducir una fórmula dependiente del número de plantas (y por tanto, indirectamente, de la frecuencia propia del edificio) y en 1957 condujo a la famosa norma del Structural Engineers Association of California (SEAOC) donde ya se incluían específicamente las características dinámicas del edificio así como su ductilidad.

En España la norma MV 101-1962 incluía un coeficiente sísmico que dependía de la zonificación del territorio, del tipo de construcción e incluso, del tipo de terreno. El auténtico cambio cuantitativo, sin embargo, se produjo con la publicación de la norma PGS-1 (1969) y su posterior modificación PDS-1 (1974) que introdujo la estructura moderna de las normas sísmicas e impulsó el desarrollo de los estudios dinámicos.

En la actualidad se encuentra pendiente de publicación una nueva Norma que trata de incluir los avances habidos desde 1974, tanto en la comprensión del riesgo sísmico, como en el análisis de estructuras y cooperación internacional (Eurocódigos).

2.1. Tectónica global

El análisis de los registros sísmicos y su interpretación en relación con la estructura supuesta de la tierra ha permitido la mejora sucesiva del acuerdo entre modelo y datos experimentales. La figura 2.1 recoge un esquema que sigue siendo válido como marco general. Existe una capa o corteza, limitada a unos 35 km de profundidad por la llamada discontinuidad de Mohorovicic, formada por rocas graníticas y basálticas. En los fondos oceánicos el granito desaparece y la corteza basáltica tiene un espesor de pocos kilómetros.

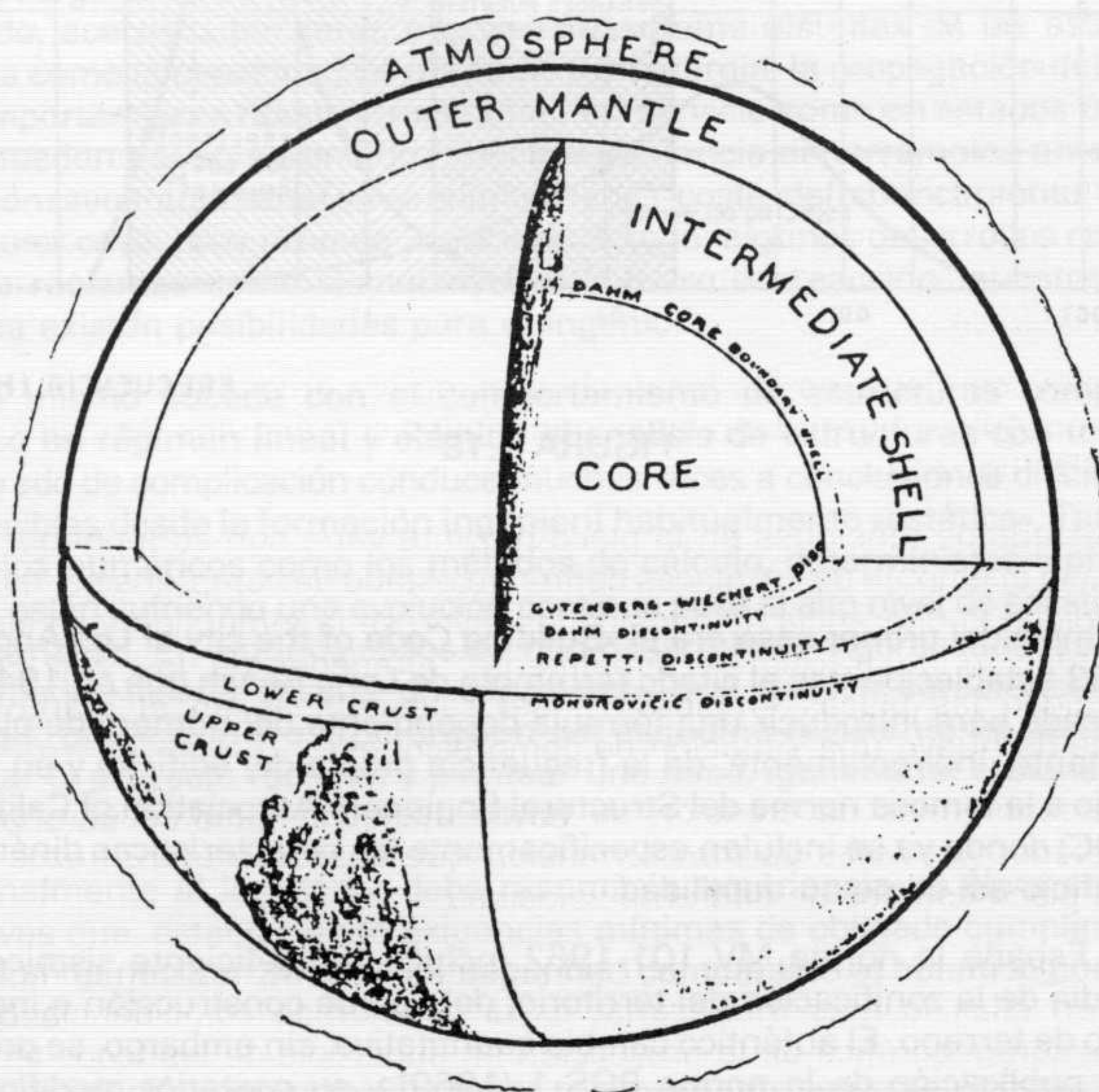


FIGURA 2.1

El conjunto anterior más una capa de unos 50 km desde la superficie forma la llamada *litosfera*. Algunos autores incluyen parte del manto superior en la idea de litosfera.

A continuación se encuentra el *manto* que llega hasta unos 2.900 km de profundidad y en el que se acostumbra a distinguir el manto *superior* y el *inferior* llegando el primero hasta una profundidad de 600 km.

A continuación y confirmando una hipótesis de Oldham (1900) se detecta una zona llamada *núcleo* hipotéticamente líquido aunque algunos autores como Lehman defienden la existencia de un *núcleo interno* a unas profundidades del orden de 5.100 km.

Para situar los terremotos tectónicos en el marco global las ideas suelen remontarse a la teoría de la *deriva continental* de Wegener, a partir de una masa inicial o Pangea. Como es sabido, la idea de un *sial* ligero flotando sobre un *simá* más denso fue inicialmente desechada al no encontrar signos de los mecanismos movilizadores de la deriva. Sin embargo el análisis de las anomalías gravimétricas en las estructuras de arcos de islas provocó la conjetura de Veining-Meisnez sobre las *corrientes de convección* en el manto que influirían de forma decisiva sobre los fenómenos tectónicos a gran escala. Finalmente la teoría de *tectónica de placas* uno de cuyos más característicos defensores fue Tuzo Wilson (1965) sirvió para unificar ideas y resultados de diferentes campos incluido el paleomagnetismo. Según estas ideas el material del manto aparece en las profundidades oceánicas provocando la apertura y separación de las capas litosféricas, *extensión del suelo oceánico*.

El ciclo se cierra en las fosas abisales de los arcos de islas donde las placas oceánicas buzan bajo las continentales con ángulos variables entre 35° y 45° (fig. 2.2).

El estado de tensiones en la placa buzante varía con su longitud; en la superficie el empuje de las placas define un estado de comprensión; a media profundidad la diferencia de densidades favorece la inmersión y se alcanza una situación de tracciones. Finalmente, alrededor de los 700 km de profundidad las placas empiezan a ser reabsorbidas en el manto y se produce de nuevo una situación de compresiones.

Los fenómenos de creación de fondo oceánico y subducción se ven completados por *fallas de transformación* que aparecen entre trozos de la misma placa dotados de diferente velocidad.

Algunas de las placas que han sido identificadas se recogen en la figura 2.3 y en ellas lo más interesante es la asombrosa coincidencia con la distribución geográfica de la proyección en superficie de los focos teóricos de origen del terremoto (*hipocentros*) a los que se denomina *epicentros* y que son determinados a nivel global por organizaciones internacionales tan pronto como se produce un sismo. De esta forma el terremoto se contempla

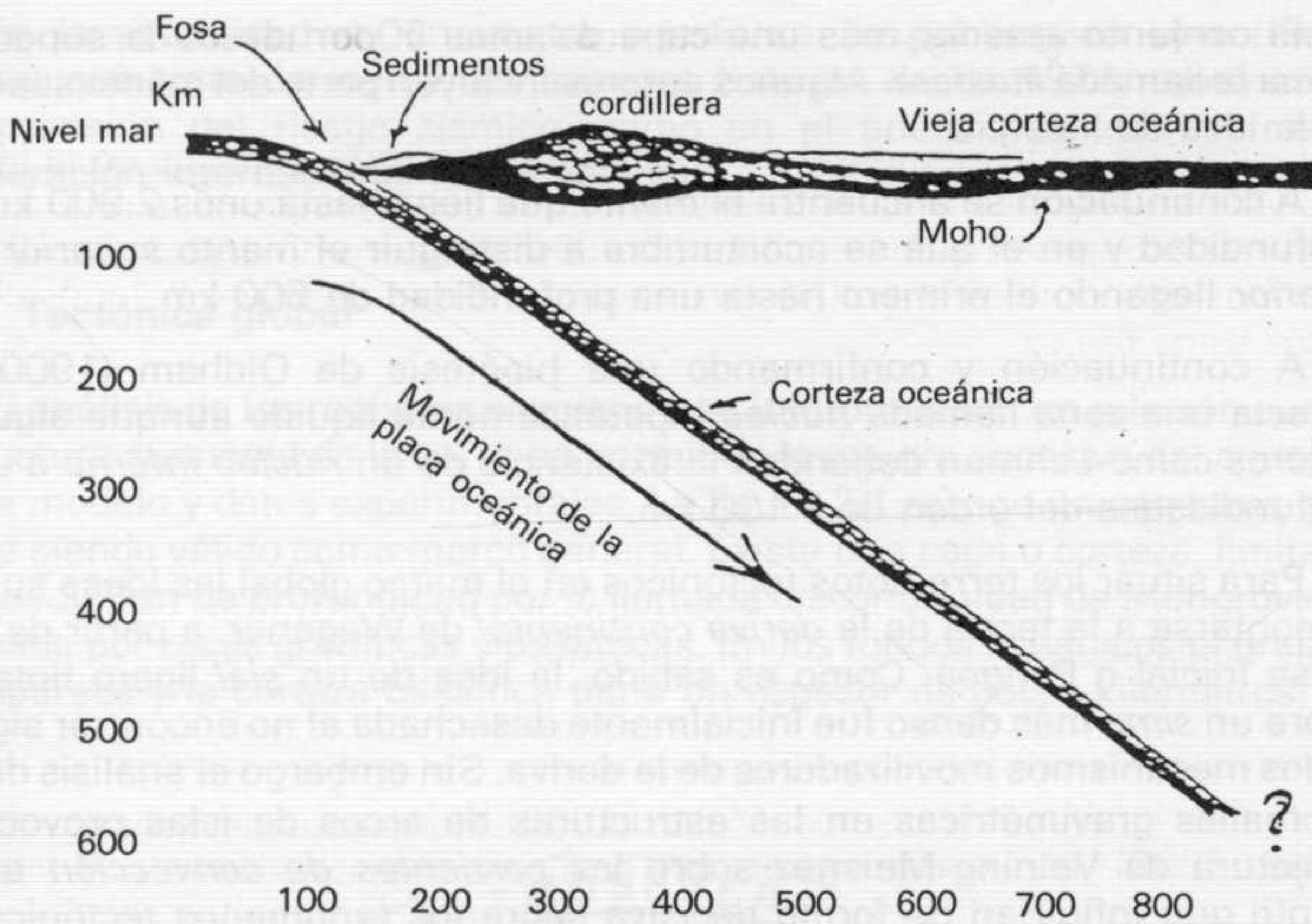


FIGURA 2.2

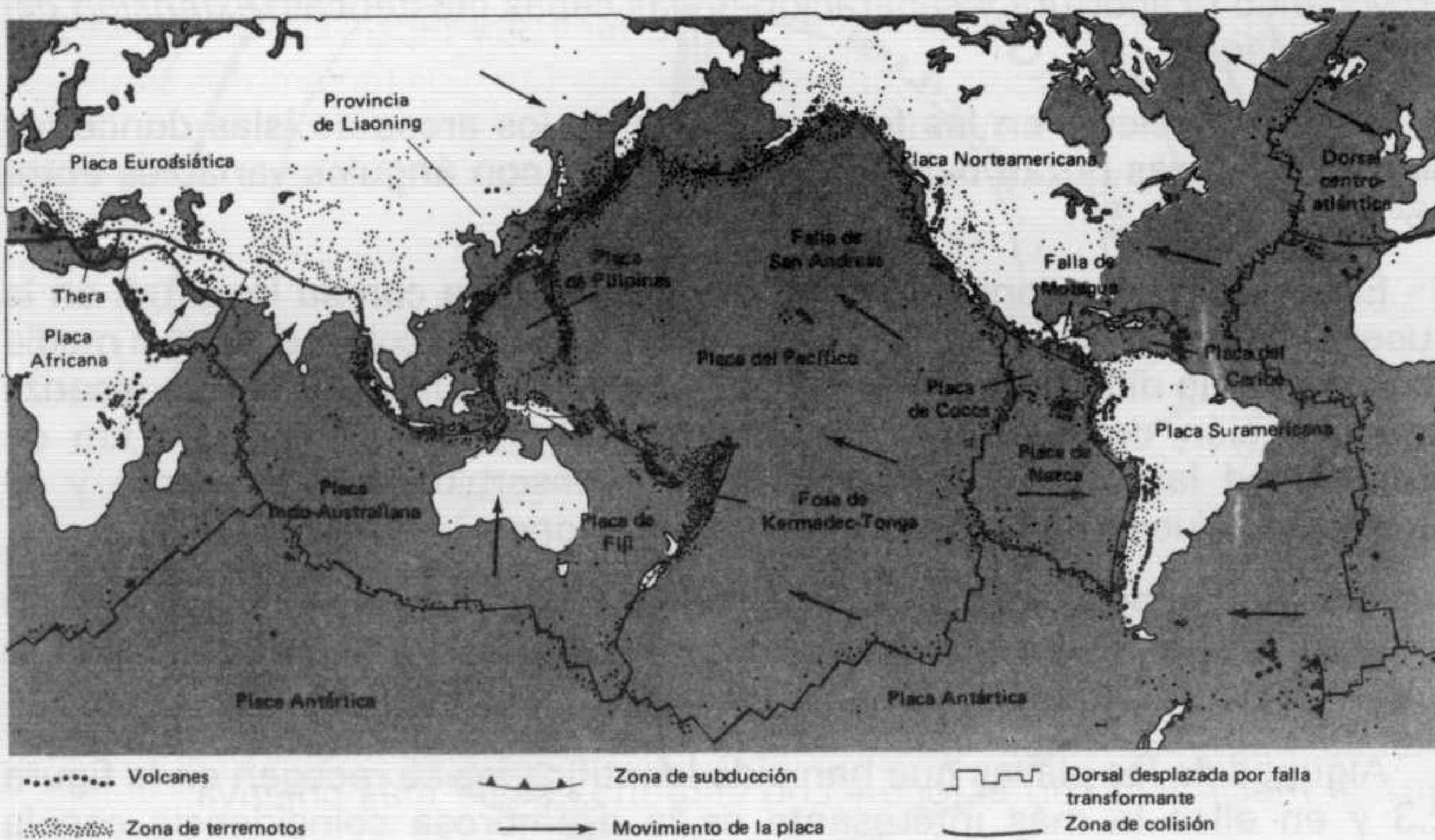


FIGURA 2.3

como un fenómeno ligado a la tectónica global y, por tanto, con orígenes mecánicos.

La idea de un foco puntual en el interior de la tierra implícita en la figura 2.3 debe ampliarse a la de zona extensa en la que se produce la rotura si se quiere ser congruente con el panorama descrito, pero no deja de ser útil en términos descriptivos e incluso cuantitativos. En el apartado 2.2 se volverá sobre estos temas.

2.2. Sismicidad

En este apartado se va a desarrollar un breve resumen relativo a las ideas de localización, tamaño y mecanismo de los terremotos.

La idea que los terremotos tienen zonas de *localización preferente* y no son fenómenos aleatorios arranca de la elaboración por von Hoff en 1840 del primer catálogo de sismos. Mallet (1860) Montessus de Ballore (1900), Milne (1900), etc. construyeron los primeros mapas sísmicos y Wadati (1830) propuso clasificar los terremotos según la profundidad del foco. Así se habla de terremotos *someros* (0-70 km), *intermedios* (70-300 km) o *profundos* (300 km).

La mayoría de los terremotos profundos están localizados en el Pacífico (fig. 2.3) y se relacionan con las zonas de subducción. En España es famoso el terremoto de Granada del 29 de marzo de 1954 localizado a 650 km de profundidad y sobre cuyo origen todavía se discute. Los terremotos someros, se encuentran en las dorsales oceánicas y en fallas de transformación, algunas tan famosas como las de San Andrés en California.

En España la figura 2.4 recoge la sismicidad del área Ibero-Magrebí; la situación de los epicentros marca la alineación de la falla Azores-Gibraltar así como la línea Málaga-Alicante y la zona pirenaica. La mayoría de los terremotos son someros aunque existe la zona ya citada de terremotos profundos y se piensa que existe un grupo intermedio a unos 100 km de profundidad.

Para estimar el *tamaño* de los terremotos existen fundamentalmente dos procedimientos: el establecimiento de la gravedad de sus efectos de acuerdo con una escala convencional, lo que conduce a la idea de *intensidad*, o la cuantificación de su importancia según el acelerograma, lo que conduce a la idea de *magnitud*. Existe igualmente la posibilidad de establecer un modelo para el *mecanismo* en el foco y con ello una escala más objetiva.

Parece que el primero en analizar un terremoto estableciendo líneas de igual daño, o *isosistas*, fue Mallet (1857).

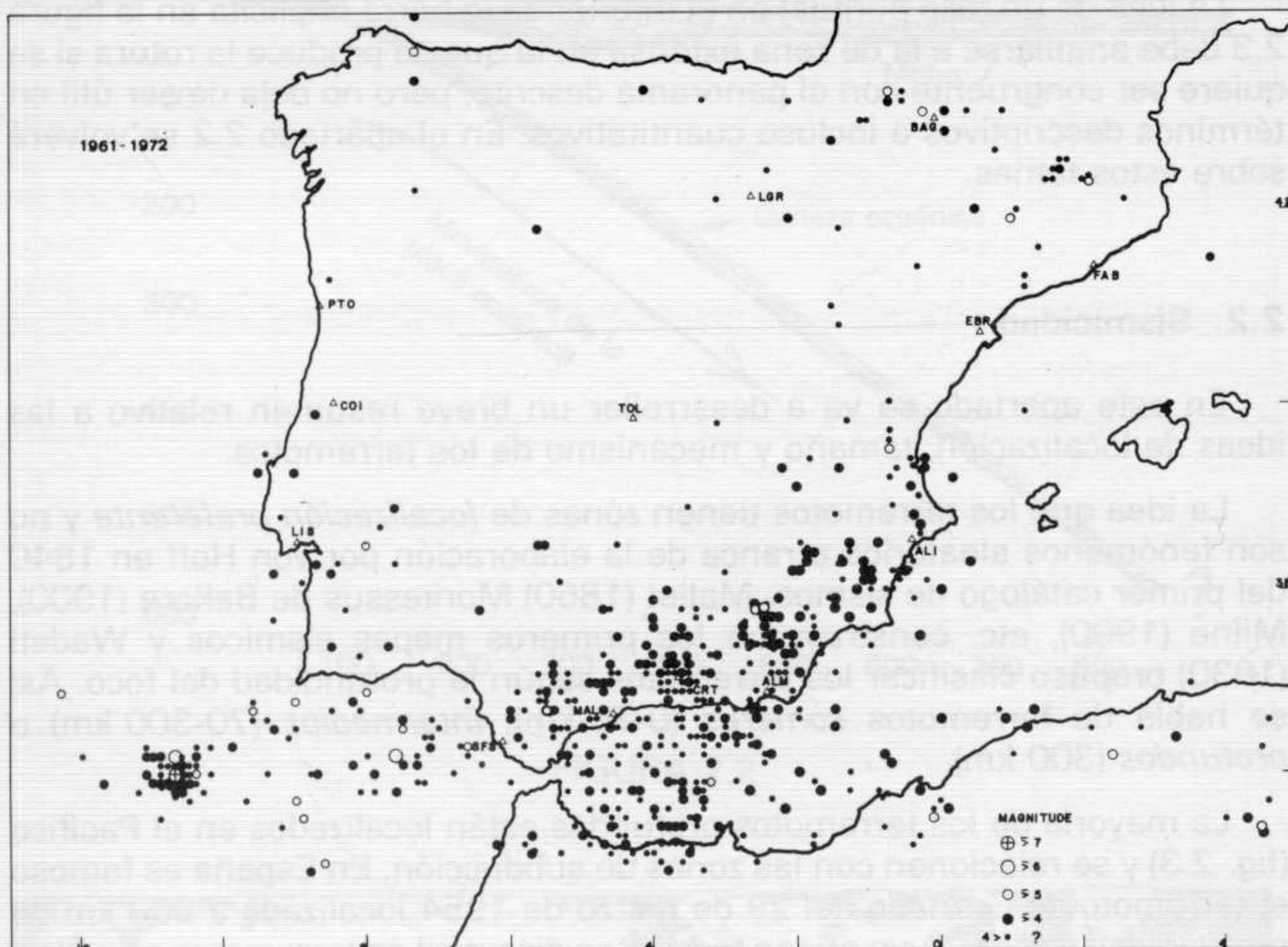


FIGURA 2.4

La idea fue desarrollada por Rossi (1874), Forel (1878), Mercalli (1883), Sieberg (1917), Wood & Neumann (1931) y Richter (1956). En general para fijar el grado de intensidad se estudian las reacciones humanas, los efectos en las estructuras y los efectos en el terreno. Debido a la subjetividad inherente en las definiciones se producen diferencias de hasta un grado incluso en observadores experimentados. Los resultados se representan mediante las isosistas como las indicadas en la figura 2.5 para el terremoto de San Fernando de 1971, donde se observa cómo se marca el epicentro y el típico alargamiento según la falla de San Andrés. La figura 2.6 recoge las isosistas del terremoto de Torrevieja de 21-3-1829, tal como se encuentra en los mapas de isosistas publicados por el Instituto Geográfico que han servido para los estudios de peligrosidad sísmica en España. A pesar de sus limitaciones las intensidades continúan utilizándose debido a la enorme cantidad de datos históricos. Además existe una tendencia a cuantificar, tal como se observa en la escala MSK (Medvedev, Sponheur y Karnik 1964) adoptada por la Norma Española y a considerar la intensidad como una

medida estadística definida para zonas y para conjuntos de elementos (estructuras, terraplenes, etc.) lo que le hace apropiado para zonificaciones y riesgo.

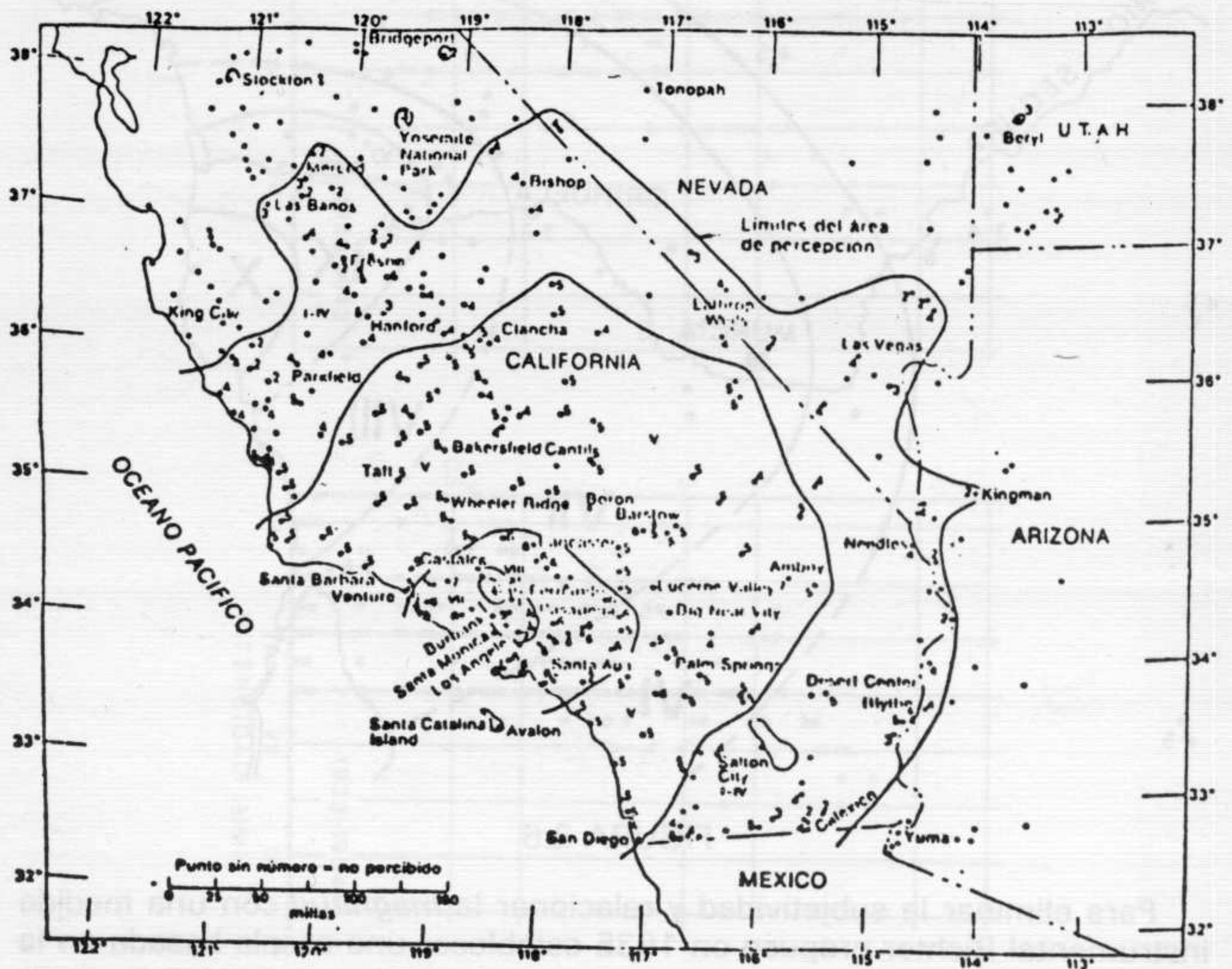


FIGURA 2.5

Se ha intentado igualmente relacionar la aceleración del suelo con la intensidad. Una fórmula clásica es

$$I = 3 \lg_{10} a + 1,5 \quad (2.1)$$

donde

a: aceleración máxima (cm/seg²).

I: intensidad Mercalli Modificada (MM).

La figura 2.7 a muestra sin embargo la enorme dispersión de los resultados. La nueva norma sísmica española prefiere establecer una relación entre una aceleración convencional y la intensidad relacionada con una cierta probabilidad de superación.

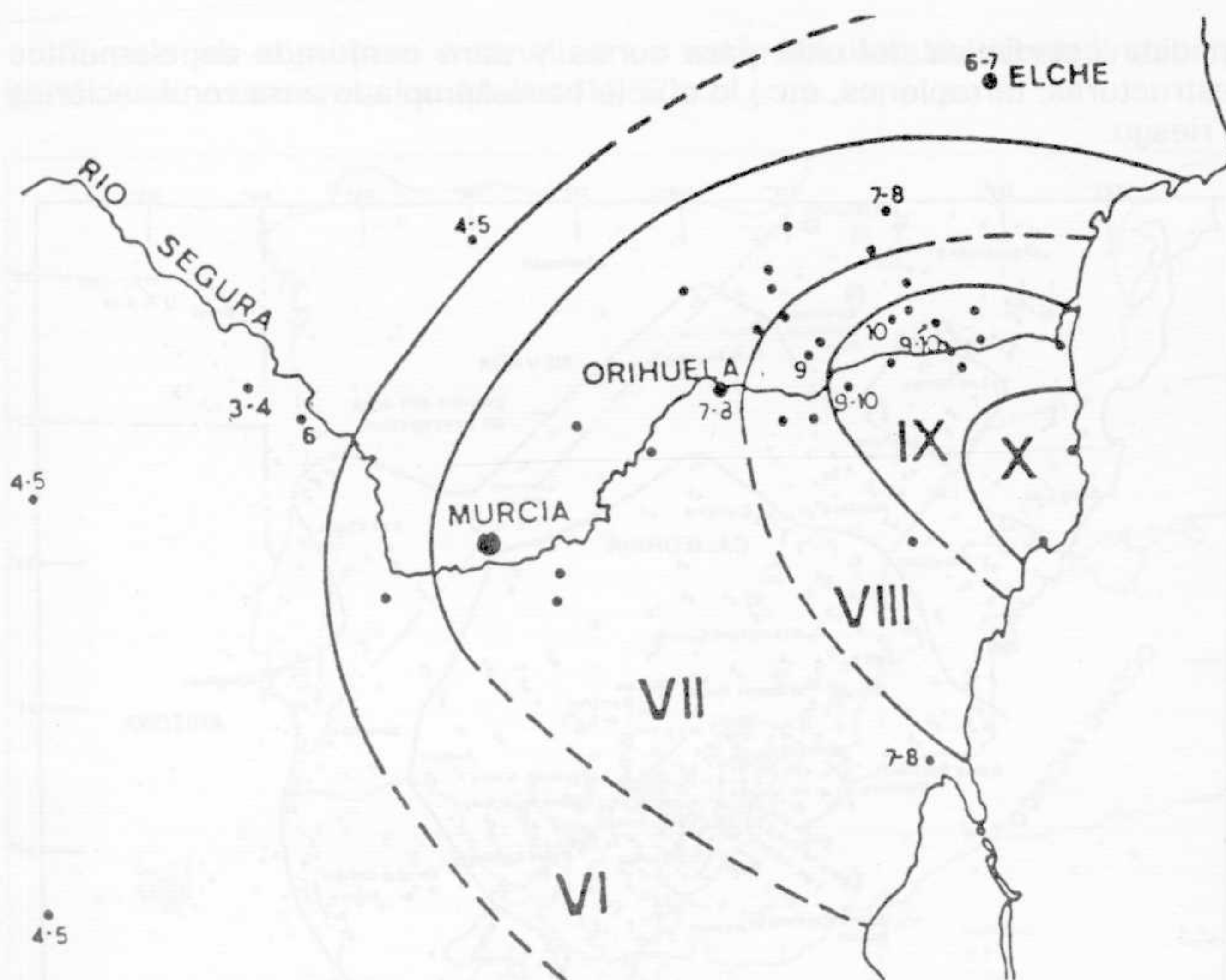


FIGURA 2.6

Para eliminar la subjetividad y relacionar la *magnitud* con una medida instrumental Richter propuso en 1935 establecer una escala basada en la amplitud de ondas.

La magnitud de Richter se define como el logaritmo de la máxima amplitud registrada por un sismógrafo de torsión de tipo Wood-Anderson, con un período de 0,8 segundos, amplificación máxima 2.800 e índice de amortiguamiento del 80 % para distancias epicentrales del orden de 100 km.

La medida se hizo rápidamente popular y se realizaron varios intentos para eliminar la dependencia del aparato, la distancia y la profundidad focal. Actualmente se manejan dos conceptos la magnitud de ondas superficiales M y la magnitud de ondas de volumen m , con expresiones

$$M = \lg_{10} \frac{A_s}{T_s} + 1,66 \lg_{10} \Delta + 3,3$$

$$m = \lg_{10} \frac{A_p}{T_p} + 0,01 \lg_{10} \Delta + 5,9$$

(2.2)

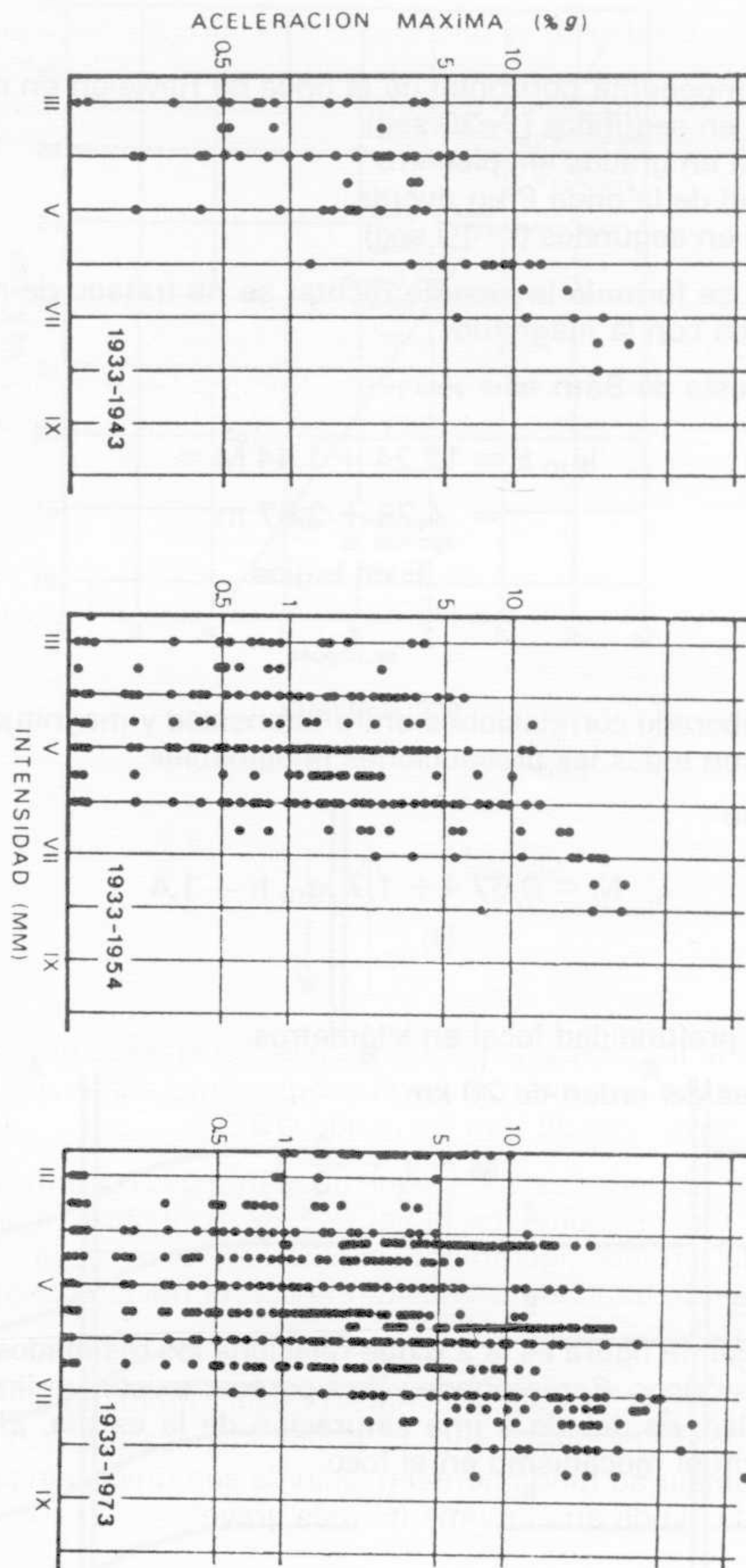


FIGURA 2.7

donde

A_s es la componente horizontal de la onda de Rayleigh en micras.

T_s : período en segundos (~ 20 seg).

Δ : distancia en grados al epicentro.

A_p : amplitud de la onda P en micras.

T_p : período en segundos (~ 10 seg).

Desde que se formuló la idea de Richter se ha tratado de relacionar la energía liberada con la magnitud.

Una propuesta de Båth es

$$\begin{aligned}\lg_{10} E &= 12,24 + 1,44 M = \\ &= 4,78 + 2,57 m \\ &\quad E \text{ en ergios}\end{aligned}\tag{2.3}$$

Se han elaborado correlaciones entre intensidad y magnitud que deben ser tomadas con todas las precauciones imaginables.

Por ejemplo

$$M = 0,67 I + 1,7 \lg_{10} h - 1,4\tag{2.4}$$

donde h es la profundidad focal en kilómetros.

Para valores del orden de 20 km.

$$M \sim 1 + \frac{2}{3} I\tag{2.5}$$

Una interesante figura es la 2.8 que relaciona los resultados de diversos terremotos históricos. Como puede verse parecer existir un límite superior que, en realidad, es debido a una saturación de la escala. El efecto está relacionado con el mecanismo en el foco.

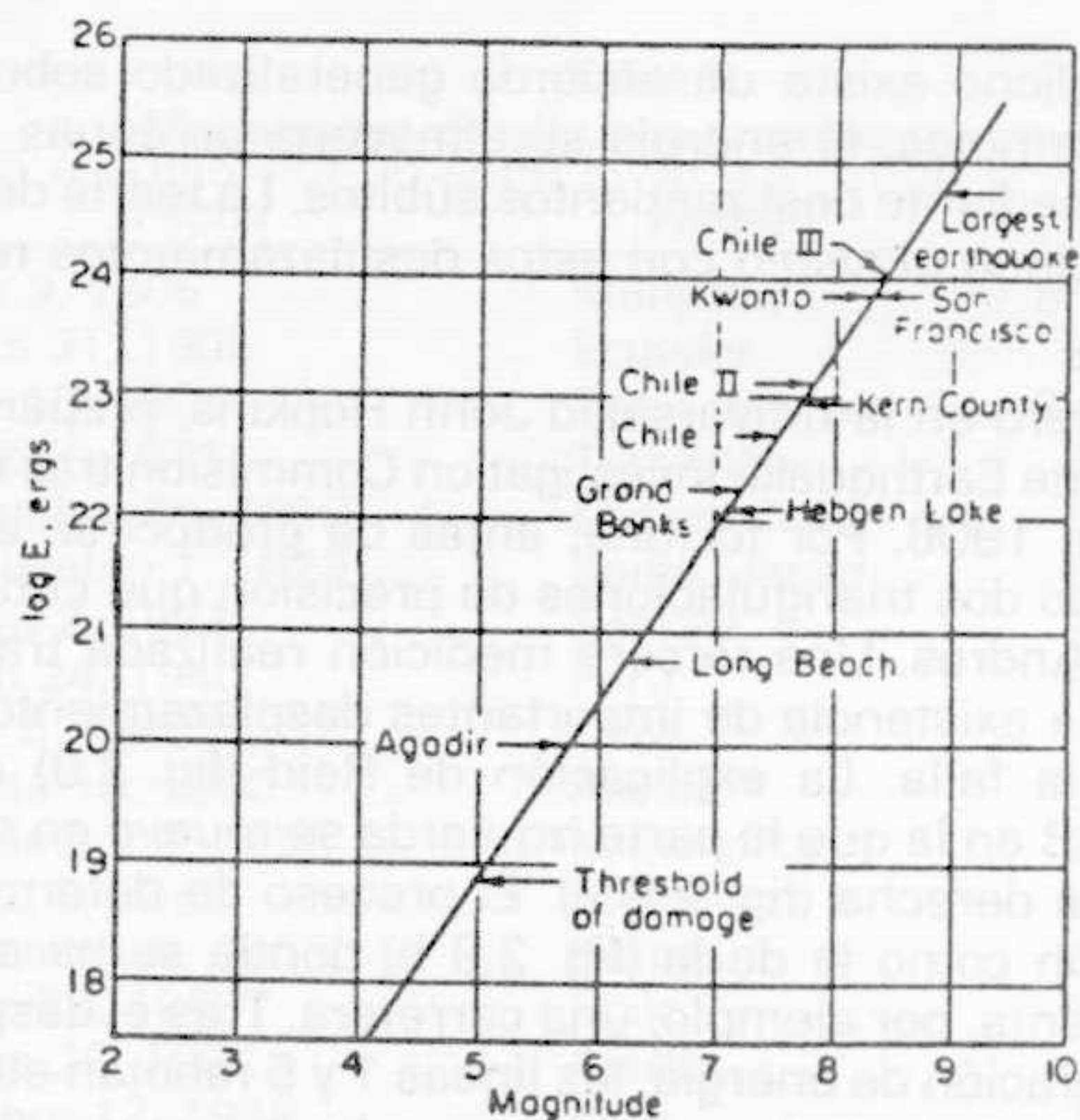


FIGURA 2.8

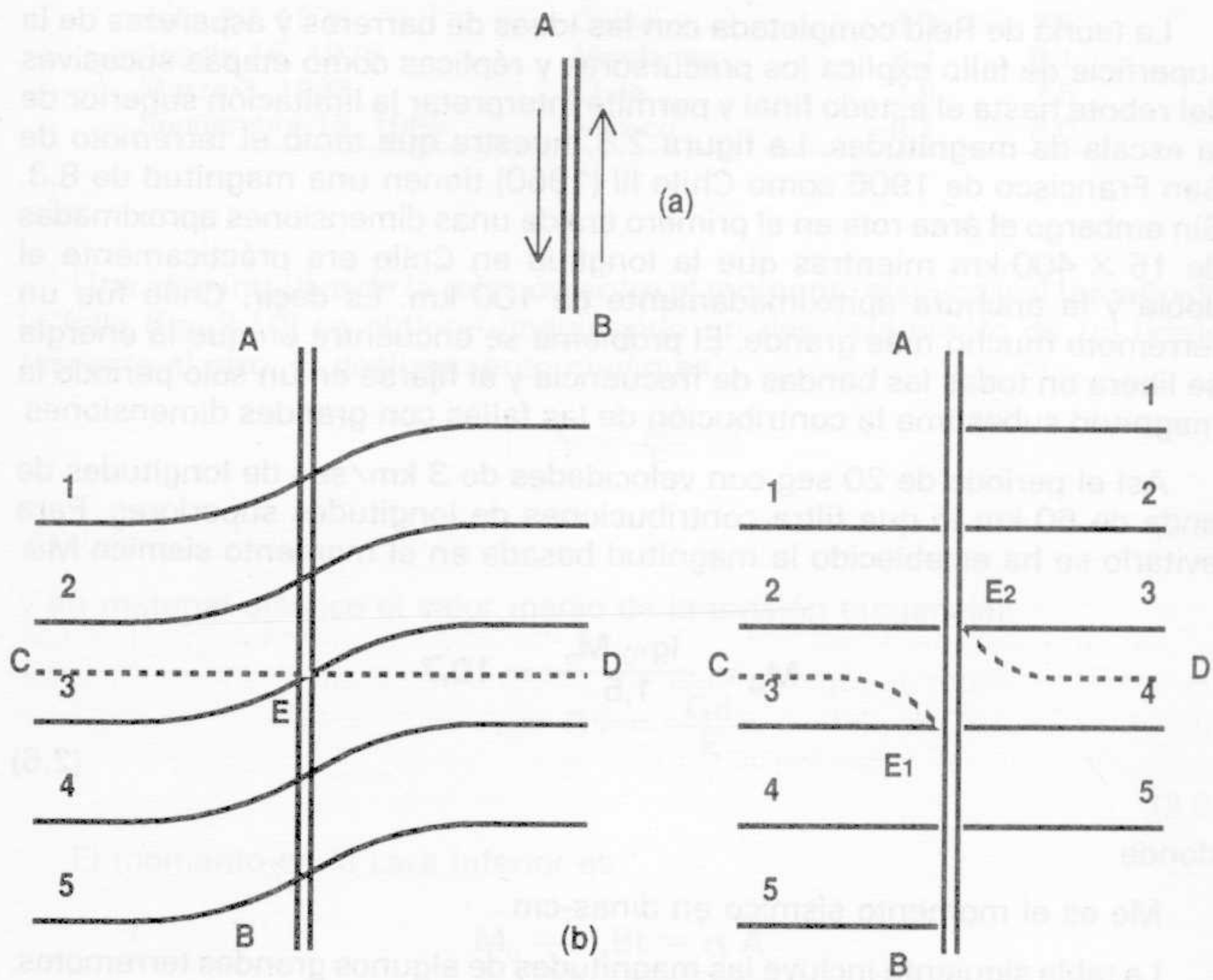


FIGURA 2.9

Como ya se ha dicho existe un acuerdo generalizado sobre el origen tectónico de los terremotos: la energía se almacena en zonas de fractura hasta que se libera mediante deslizamientos súbitos. La teoría de Reid, o del *rebote elástico*, relaciona el sismo con estos desplazamientos repentinos a lo largo de fallas.

H. F. Reid, ingeniero en la universidad John Hopkins, preparó la parte II del Report of the State Earthquake Investigation Commission tras el terremoto de San Francisco de 1906. Por fortuna, antes de producirse el sismo, se habían llevado a cabo dos triangulaciones de precisión que cubrían el área de la Falla de San Andrés. Una tercera medición realizada tras el evento mostró claramente la existencia de importantes desplazamientos (de hasta 6,5 m) paralelos a la falla. La explicación de Reid (fig. 2.9) consiste en imaginar una falla AB en la que la parte izquierda se mueve en sentido antihorario respecto a la derecha (fig. 2.9 a). El proceso de deformación lenta implica una situación como la de la (fig. 2.9 b) donde se ha añadido una línea CD que representa, por ejemplo, una carretera. Tras el desplazamiento provocado por la liberación de energía, las líneas 1 y 5 rebotan elásticamente y quedan definitivamente cortadas mientras que la «carretera» CD sufre una distorsión final.

La teoría de Reid completada con las ideas de barreras y asperezas de la superficie de fallo explica los precursoros y réplicas como etapas sucesivas del rebote hasta el estado final y permite interpretar la limitación superior de la escala de magnitudes. La figura 2.8 muestra que tanto el terremoto de San Francisco de 1906 como Chile III (1960) tienen una magnitud de 8.3. Sin embargo el área rota en el primero era de unas dimensiones aproximadas de 15×400 km mientras que la longitud en Chile era prácticamente el doble y la anchura aproximadamente de 100 km. Es decir, Chile fue un terremoto mucho más grande. El problema se encuentra en que la energía se libera en todas las bandas de frecuencia y al fijarse en un solo período la magnitud subestima la contribución de las fallas con grandes dimensiones.

Así el período de 20 seg con velocidades de 3 km/seg da longitudes de onda de 60 km lo que filtra contribuciones de longitudes superiores. Para evitarlo se ha establecido la magnitud basada en el momento sísmico M_w

$$M_w = \frac{\lg_{10} M_0}{1,5} - 10,7 \quad (2.6)$$

donde

M_0 es el momento sísmico en dinas-cm.

La tabla siguiente incluye las magnitudes de algunos grandes terremotos.

Tabla II
Magnitudes de algunos grandes terremotos

Fecha	Región	M _s	M _ω
Julio 9, 1905	Mongolia	8 1/4	8.4
Enero 31, 1906	Ecuador	8.6	8.8
Abril 18, 1906	San Francisco	8 1/4	7.9
Enero 3, 1911	Turkestán	8.4	7.7
Diciembre 16, 1920	Kansu, China	8.5	7.8
Septiembre 1, 1923	Kanto, Japan	8.2	7.9
Marzo 2, 1933	Sanriku	8.5	8.4
Mayo 24, 1940	Perú	8.0	8.2
Abril 6, 1943	Chile	7.9	8.2
Agosto 15, 1950	Assam	8.6	8.6
Noviembre 4, 1952	Kamchatka	8	9.0
Marzo 9, 1957	Aleutianas	8	9.1
Noviembre 6, 1958	Kuriles	8.7	8.3
Mayo 22, 1960	Chile	8.3	9.5
Marzo 28, 1964	Alaska	8.4	9.2
Octubre 17, 1966	Perú	7.5	8.1
Agosto 11, 1969	Islas Kuriles	7.8	8.2
Octubre 3, 1974	Perú	7.6	8.1
Julio 27, 1976	China	8.0	7.5
Agosto 16, 1976	Mindanao	8.2	8.1
Marzo 3, 1985	Chile	7.8	7.5
Septiembre 19, 1985	México	8.1	8.0

Una idea intuitiva de la relación entre el momento sísmico y el tamaño de la falla (fig. 2.10) se obtiene imaginando un desplazamiento de un borde respecto al otro. El deslizamiento medio es

$$\gamma = \frac{d}{E} \quad (2.7)$$

y en material elástico el valor medio de la tensión tangencial

$$\tau = G\gamma = \frac{Gd}{E} \quad (2.8)$$

El momento en la cara inferior es

$$M_0 = \tau L B t = \tau t A \quad (2.9)$$

pero en virtud de (2.8)

$$M_0 = A d G$$

que muestra la dependencia en el área rota A , el desplazamiento relativo d y el módulo de rigidez del material G .

La determinación de la orientación de la falla se suele hacer estudiando el sentido de los primeros impulsos de la onda P y proyectándolos en una esfera localizada alrededor del epicentro tras deshacer el camino.

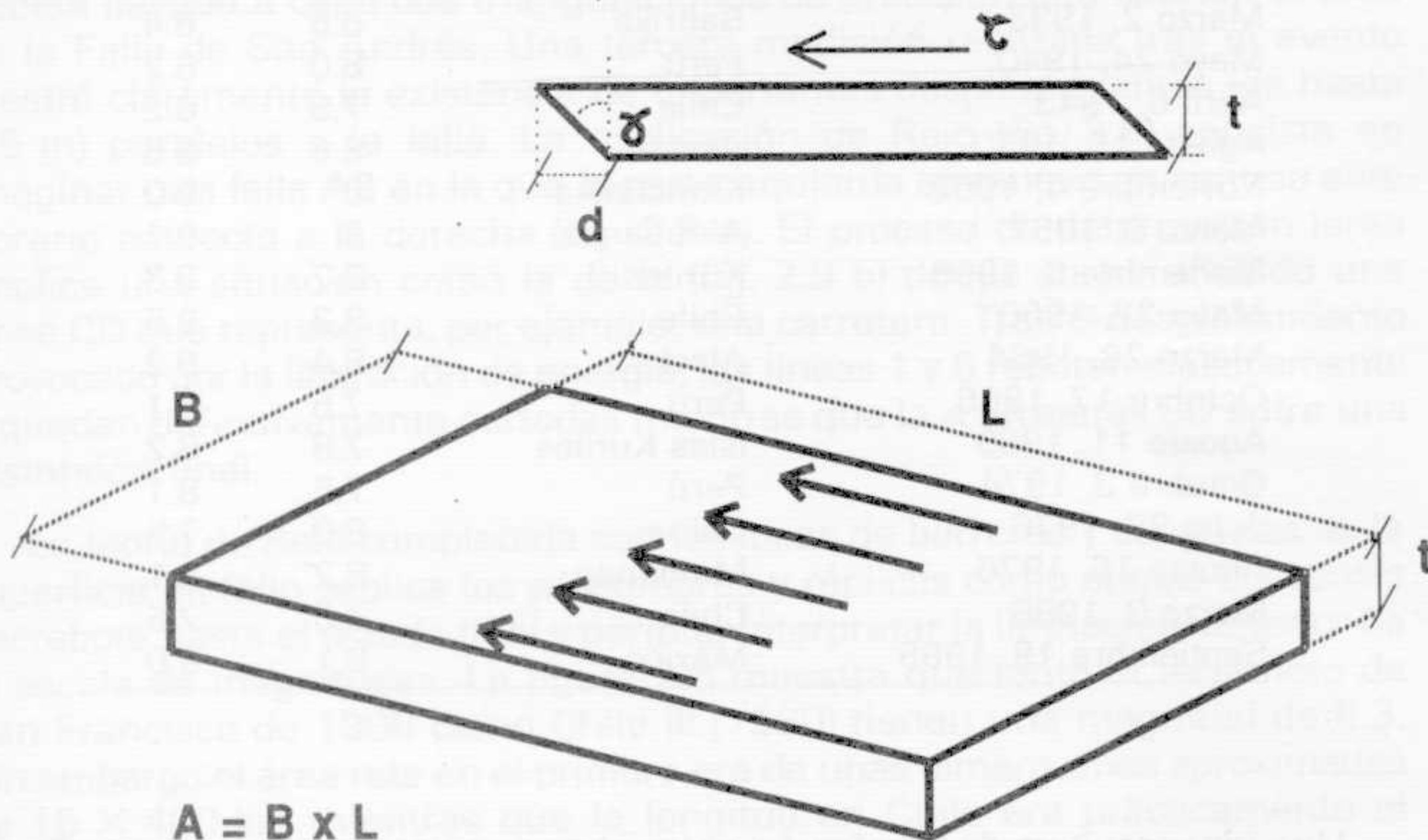


FIGURA 2.10

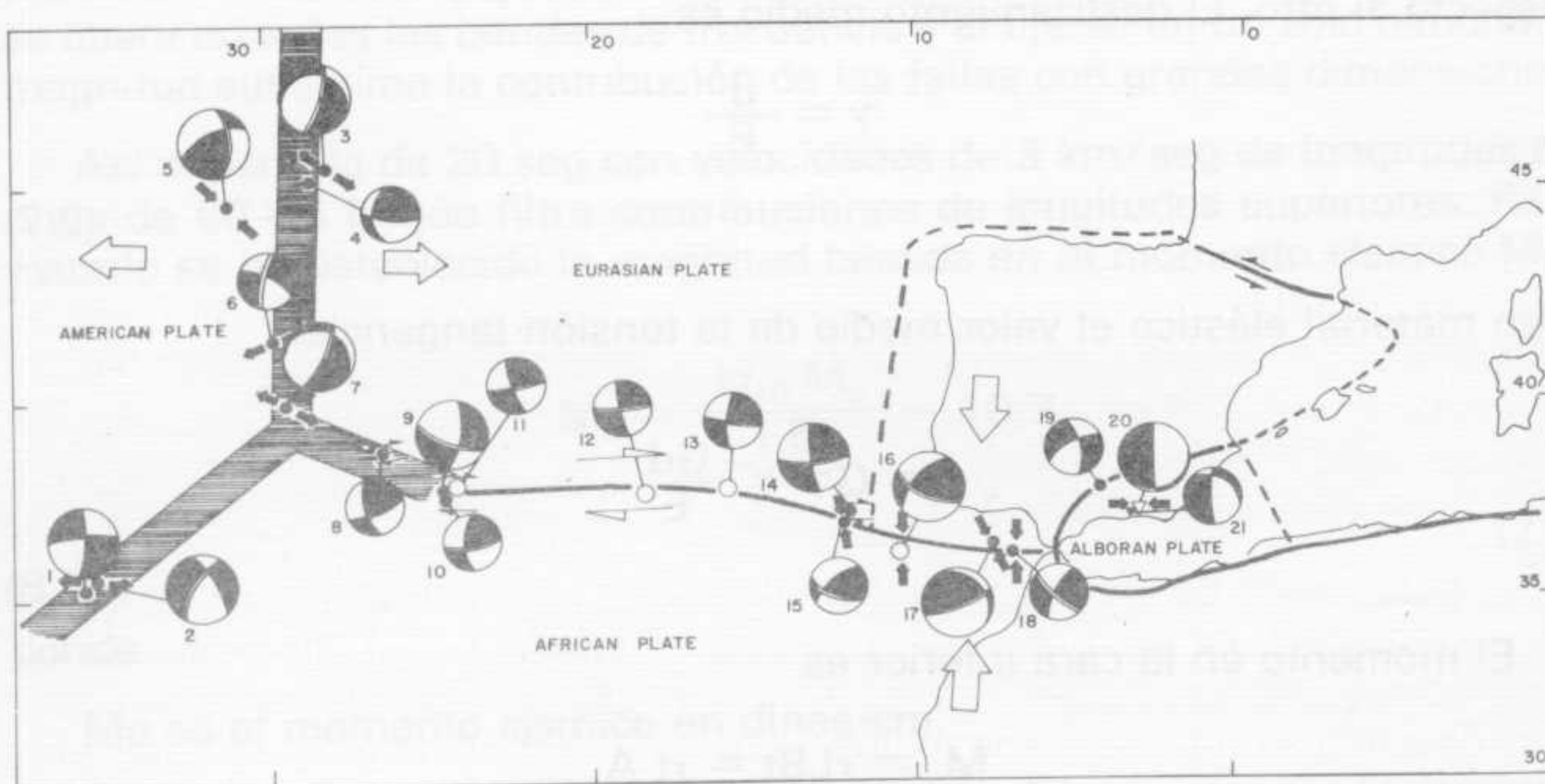


FIGURA 2.11

La figura 2.11 preparada por A. Udías recoge algunos mecanismos en la zona de contacto de las placas africana y europea.

3. Definición ingenieril de la acción. Espectro elástico

Desde el punto de vista de cálculo se precisa el establecimiento de las acciones. El método más interesante es la definición de un acelerograma en el emplazamiento (fig. 3.1.).

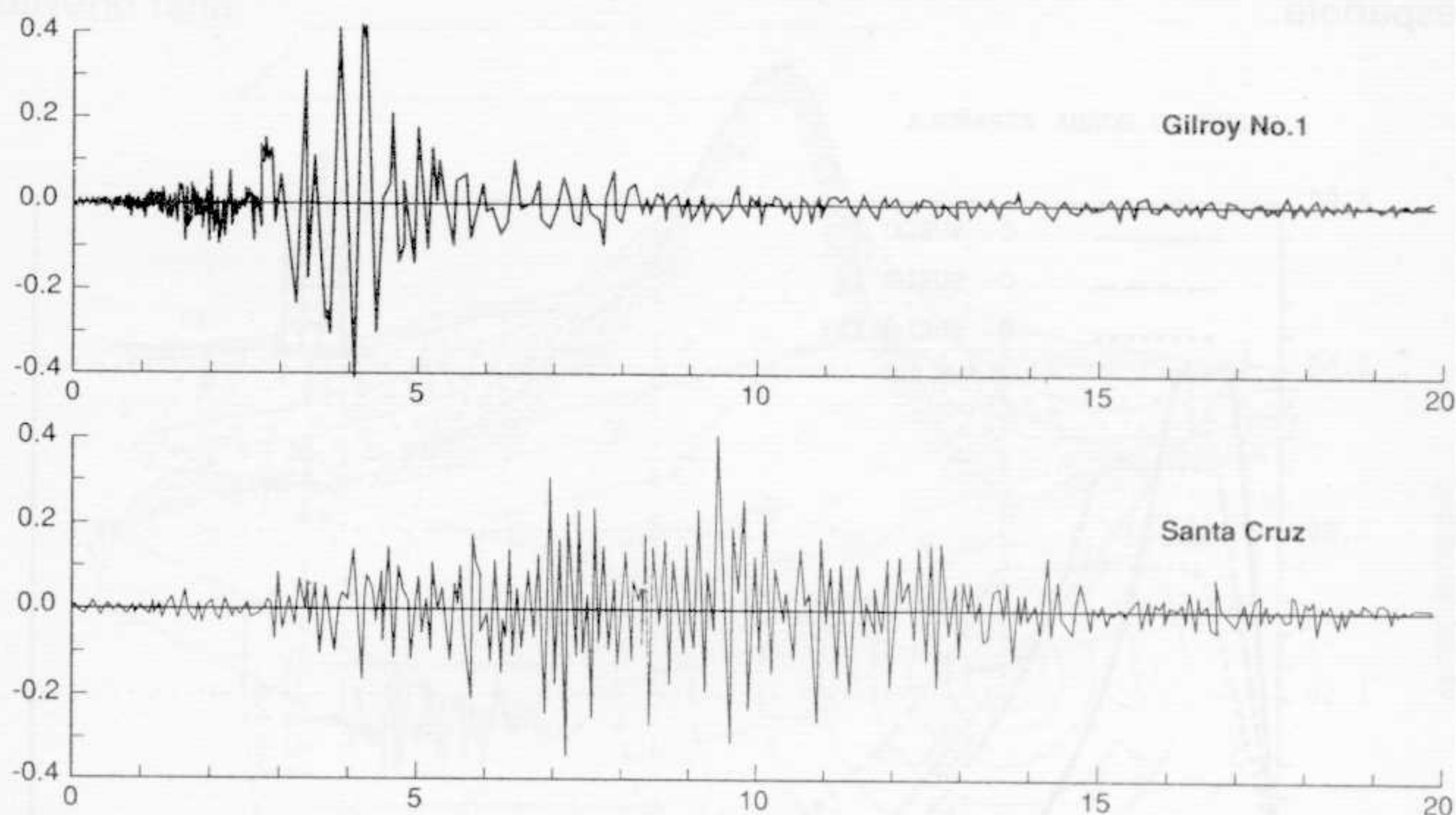


FIGURA 3.1

Aquí se tropieza con el carácter aleatorio del fenómeno así como el número limitado de acelerogramas disponibles en cada lugar. Por si fuera poco la respuesta de las estructuras en régimen no lineal es muy sensible tanto a la duración como a los detalles del acelerograma, lo que complica la definición. Se prefiere por ello recurrir a características globales en la descripción correspondiente (duración, forma de la envolvente, valor al dominio del tiempo máximo de la aceleración, etc. y de la frecuencia (contenido de frecuencias, densidad espectral, etcétera).

La generación de terremotos artificiales útiles para estudiar la sensibilidad de una estructura se basa en una descomposición del movimiento en armónicos cuyas amplitudes responden a densidades espectrales semejantes a las obtenidas en terremotos reales y cuyas diferencias de fase tienen una distribución aleatoria uniforme, en cuyo caso se modulan las amplitudes para simular un proceso no estacionario, o gaussiana.

En sismica existe además una representación que ha hecho fortuna: el *espectro de respuesta elástica*; se trata de representar la respuesta máxima de un sistema con un grado de libertad en función de su frecuencia propia y su índice de amortiguamiento en régimen elástico.

Repetido el trabajo para todos los acelerogramas disponibles y una vez normalizados a una aceleración máxima de referencia (generalmente 1 g en el suelo) se puede obtener un valor medio o característico que se incorpora a las Normas de buena práctica.

La figura 3.2 recoge lo que serán incluidos en la próxima Norma sísmica española.

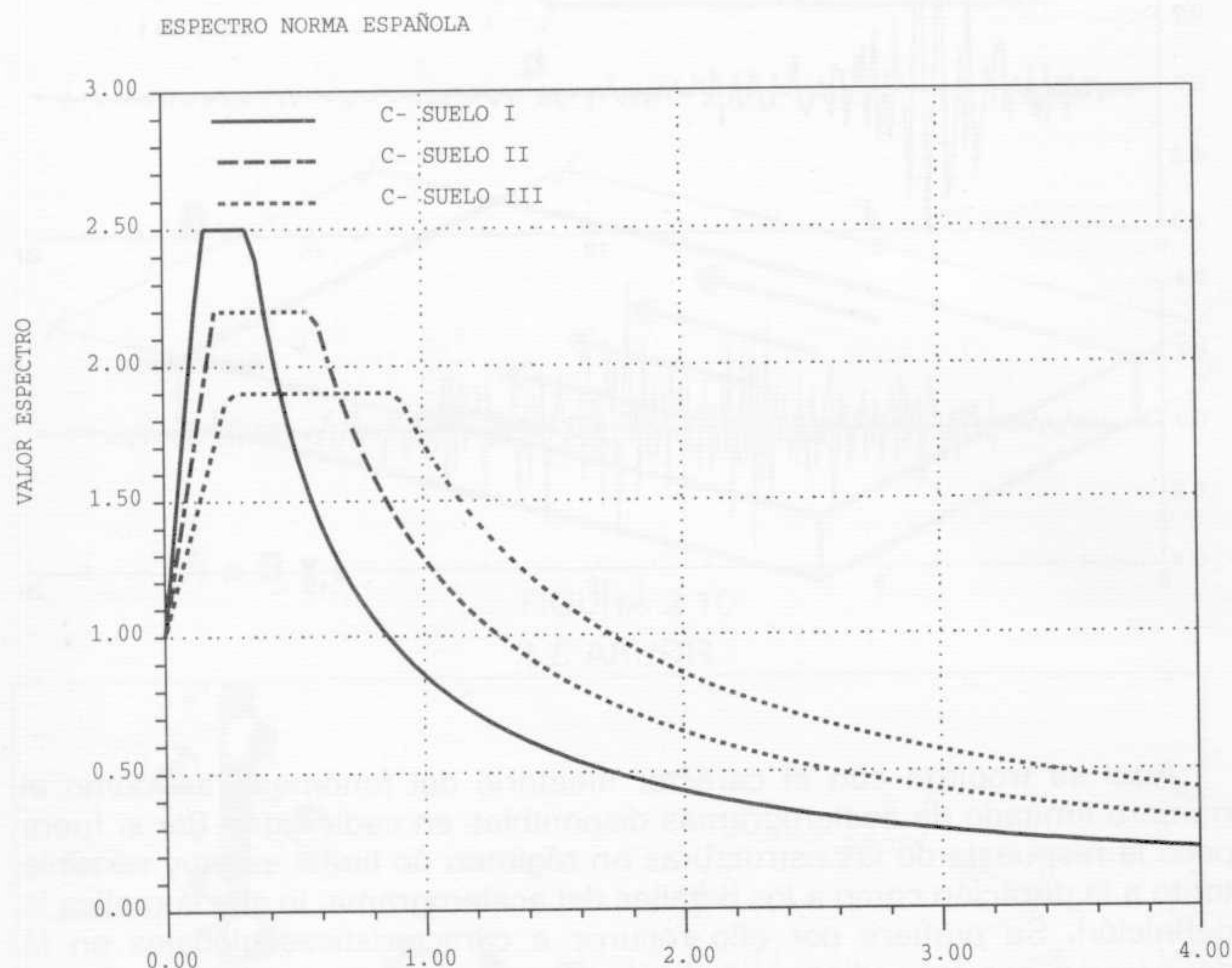


FIGURA 3.2

El espectro es distinto para diferentes tipos de suelos, lo que refleja el filtrado local de la señal según el terreno de cimentación.

Finalmente, a partir de este espectro elástico se obtiene un *espectro de proyecto* modificando las ordenadas para corregir deficiencias de registro (caso de los períodos largos) en sentido conservador. Además si se admiten

plastificaciones de la estructura se pueden reducir los valores con un *coeficiente de ductilidad*.

4. Influencia del terreno. Interacción terreno-estructura

Como ya se ha dicho en el apartado 1, la presencia del terreno puede considerarse desde dos puntos de vista: la situación de servicio en la que el terreno transmite los movimientos modificando según sus características mecánicas la sollicitación sísmica y la situación última en la que el propio terreno falla.

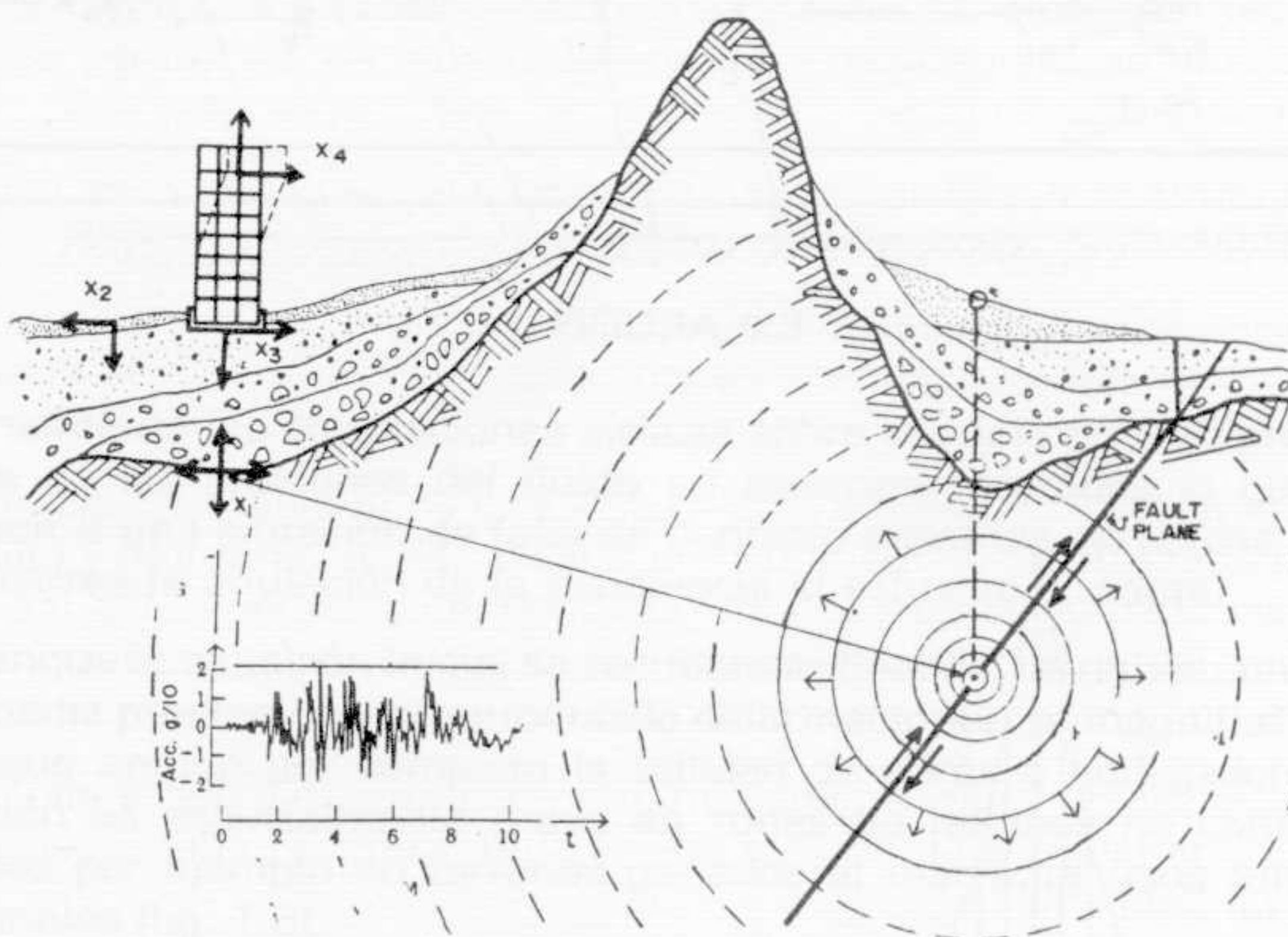


FIGURA 4.1

Una de las posibilidades más espectaculares en este último caso es la licuación.

La aplicación de la Mecánica de los Medios continuos para modelar el suelo tropieza con dificultades relacionadas con el tratamiento simultáneo de las tres fases que lo constituyen: particulares de suelo, agua y gases así como por el complejo comportamiento de las ondas a su paso por esa mezcla. Un modelo habitualmente empleado, el de Biot, demuestra que además de las ondas clásicas se propagan nuevos tipos lo que hace muy complicado un tratamiento riguroso del tema. En general se parte de hipótesis muy simplificadas: estratos horizontales, ondas S propagándose verticalmente, medios heterogéneos a trozos, etc. que permiten estimaciones con un alto grado de incertidumbre.

En casos especiales (centrales nucleares, presas, grandes puentes) se recurre a modelos más refinados de elementos finitos o elementos de contorno así como a leyes de comportamiento especiales.

Un problema típico es la modificación de la sollicitación que se produce en un determinado emplazamiento cuando la base no es rocosa sino está constituida por un depósito de suelo con características elásticas y disipativas variables.

Tanto éstas como la geometría y dimensiones del depósito afectan el resultado amplificando los valores de la respuesta en ciertas bandas de frecuencia.

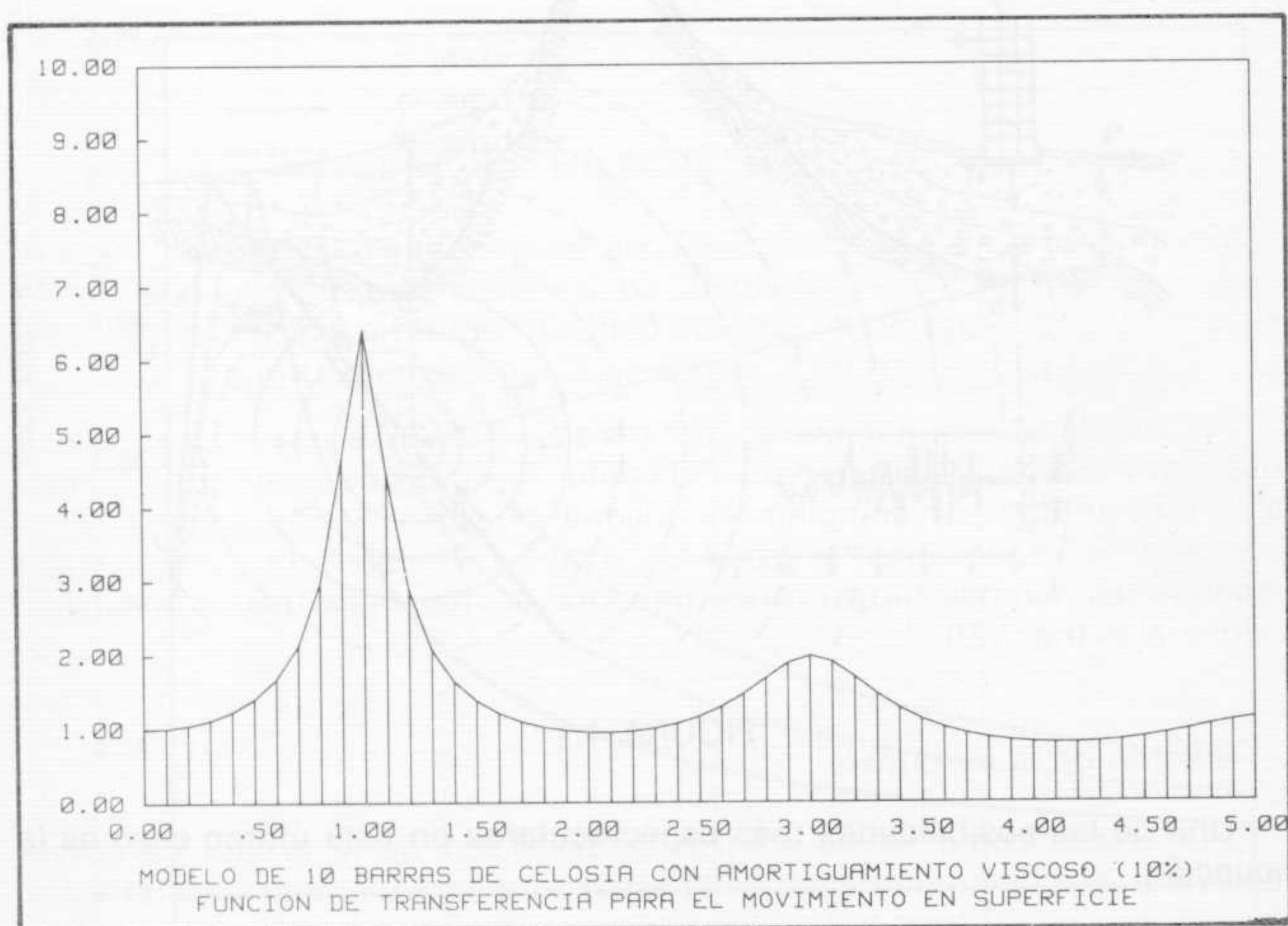


FIGURA 4.2

Tal como se dijo, el reconocimiento de este efecto se recoge en las Normas cambiando la forma del espectro de respuesta (fig. 3.2).

Otro problema que se puso de manifiesto durante la construcción de centrales nucleares fue la llamada interacción terreno-estructura.

Por un lado se produce un efecto «cinemático»: la rigidez de la estructura impide que el terreno se deforme igual que en campo libre lo que induce movimientos distintos a los previstos. Por otro lado la flexibilidad y amortiguamiento del suelo se combina con el de la estructura cambiando sus características dinámicas. Ambos efectos son importantes y en algunos casos favorecen el comportamiento de la estructura lo que ha impulsado su investigación.

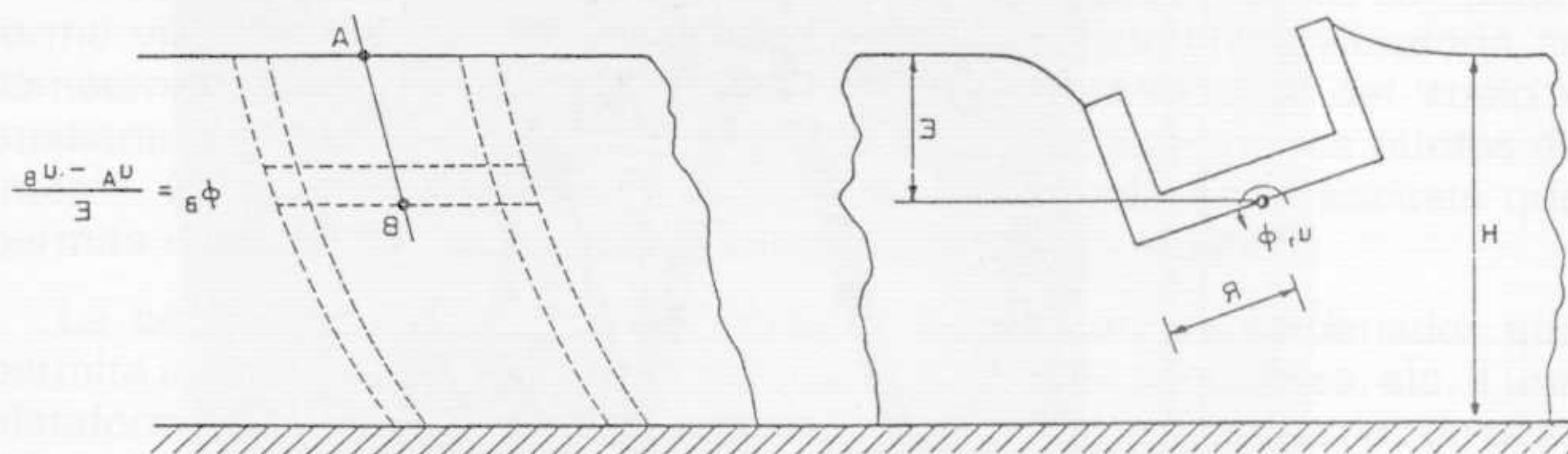


FIGURA 4.3

Finalmente las solicitaciones cíclicas sobre el suelo pueden provocar la subida de las presiones del fluido en terrenos saturados lo que puede conducir a una situación de falta de contacto entre las partículas de suelo que acarrea la anulación de la resistencia al esfuerzo cortante.

Aunque la situación inicial se recupere al final del terremoto en la etapa intermedia pueden haberse producido deformaciones de magnitud imprevisible que anulen por completo la utilidad de obras o edificaciones. Esta situación es especialmente grave en zonas de rellenos no consolidados situados por ejemplo en terrenos ganados al mar para usos turísticos o industriales (fig. 1.3).

5. Cálculo de la respuesta

Tan pronto como se ha elegido la definición de la acción se puede recurrir a un modelo numérico de la estructura para plantear o resolver las correspondientes ecuaciones de equilibrio dinámico.

El procedimiento, prohibitivo antes de la disponibilidad de los ordenadores, es actualmente una cuestión de rutina para los gabinetes de cálculo.

El modelo de la estructura se realiza mediante elementos finitos dependiendo su complejidad de la propia de la estructura en estudio. El equilibrio se plantea con el método directo de la rigidez que entronca con el clásico principio de los trabajos virtuales y la resolución de las ecuaciones se realiza mediante métodos de integración paso a paso en régimen no lineal o mediante el análisis modal si se trata de comportamiento lineal; en este

último caso se recurre a veces al estudio en frecuencia cuando se precisa la introducción del terreno en el modelo global.

Es asombroso el avance realizado en cada una de las etapas precitadas, incluidos los métodos matemáticos para la obtención de modos y frecuencias



FIGURA 5.1

propias en sistemas con un número enorme de grados de libertad (iteración por subespacios, Lanczos, etc.).

Igualmente sorprendente ha sido la creciente posibilidad de modelar comportamientos complejos de los materiales de que está formada la estructura. La disponibilidad de la capacidad de cálculo de los computadores ha permitido desarrollar leyes de comportamiento para cargas cíclicas sólidamente fundamentadas en principios termodinámicos y representando

efectos no lineales (plasticidad), diferidos en el tiempo (fluencia, relajación, licuación de suelos), evolución de fracturas o daño, fisuración, etcétera.

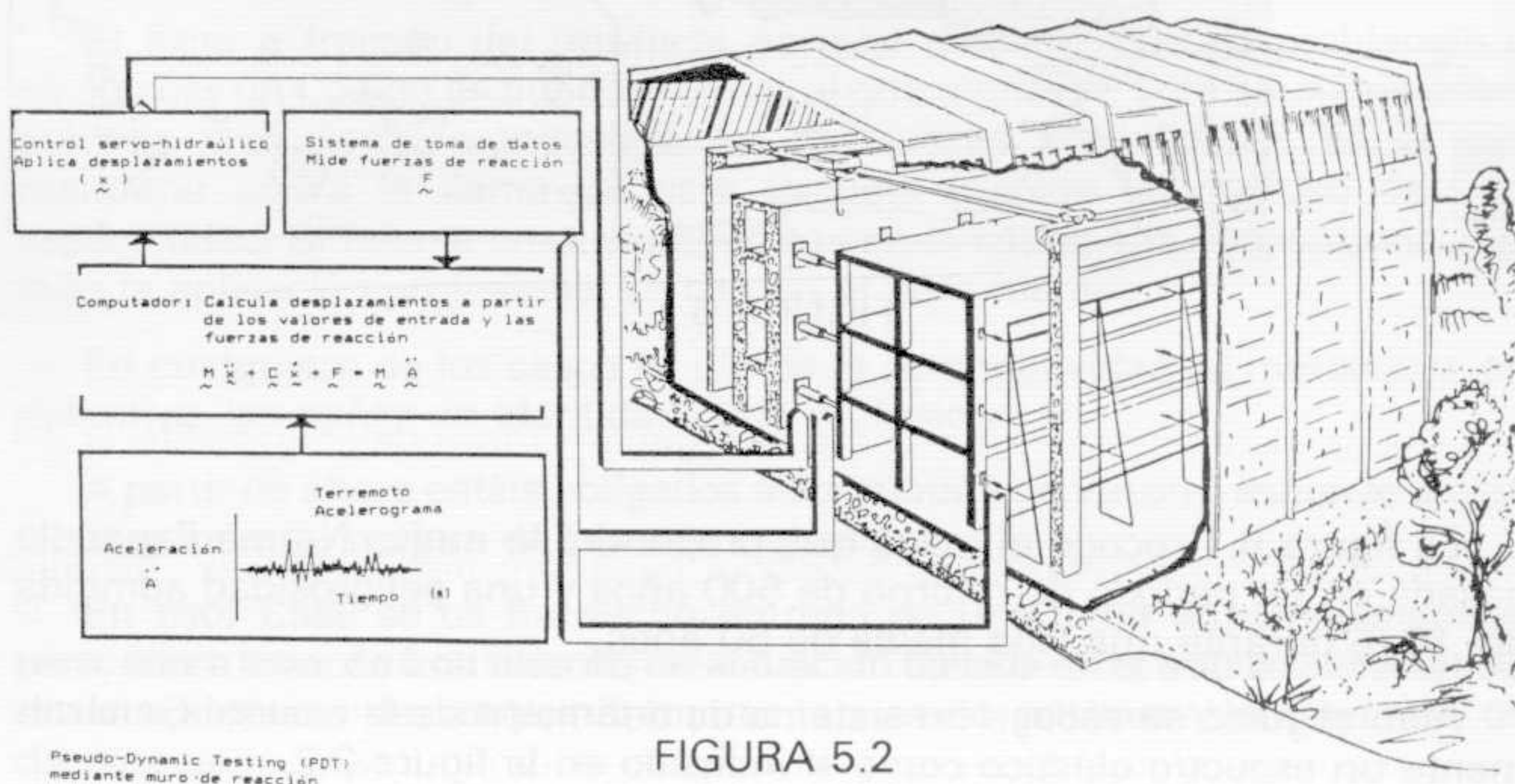
Las posibilidades son tales que el esfuerzo de investigación se dirige hacia los métodos experimentales que permitan demostrar la importancia relativa de cada una de las ideas que ha sido sugerida para explicar los diferentes fenómenos.

En este sentido son interesantes los experimentos realizados con plataforma vibratoria o con muro de reacción. En la plataforma vibratoria se someten las estructuras a una sollicitación semejante a la del suelo y mediante captosres adecuados se recogen las respuestas de los puntos de interés. La figura 5.1 recoge la plataforma construida en la Escuela que permite ensayos de cierto interés tanto teórico como práctico.

La central oleohidráulica está gobernada por un miniordenador que permite aplicar acelerogramas sintéticos, oscilaciones senoidales, etc. a una plataforma de 2×2 m que acepta estructuras de hasta 2 toneladas de peso dependiendo del rango de frecuencias exigido.

El inconveniente de las plataformas vibratorias es precisamente la limitación en cuanto al tamaño de las estructuras que pueden ser ensayadas. Por ello se ha desarrollado un método mixto el llamado PDT o muro de reacción en el que se permite, a través de un sistema enormemente computerizado, aplicar las cargas estáticas equivalentes a las dinámicas que actuarían sobre la estructural real, y ello a través de una resolución on-line del sistema en el propio ordenador de control.

La Escuela participa a través del Laboratorio de Estructuras en los desarrollos que la Comunidad Europea ha encargado a los laboratorios del ISPRA en Italia donde el esfuerzo conjunto ha permitido la construcción de un muro de reacción excepcional (fig. 5.2).



6. Normativa

La normativa sísmica basada en los principios de la mecánica racional es relativamente reciente como corresponde a la tardía adquisición de datos sobre la acción sísmica.

En primer lugar una norma debe resolver los problemas de zonificación del territorio basándose en un estudio de la sismicidad histórica y en el establecimiento de los niveles de una peligrosidad sísmica aceptable.

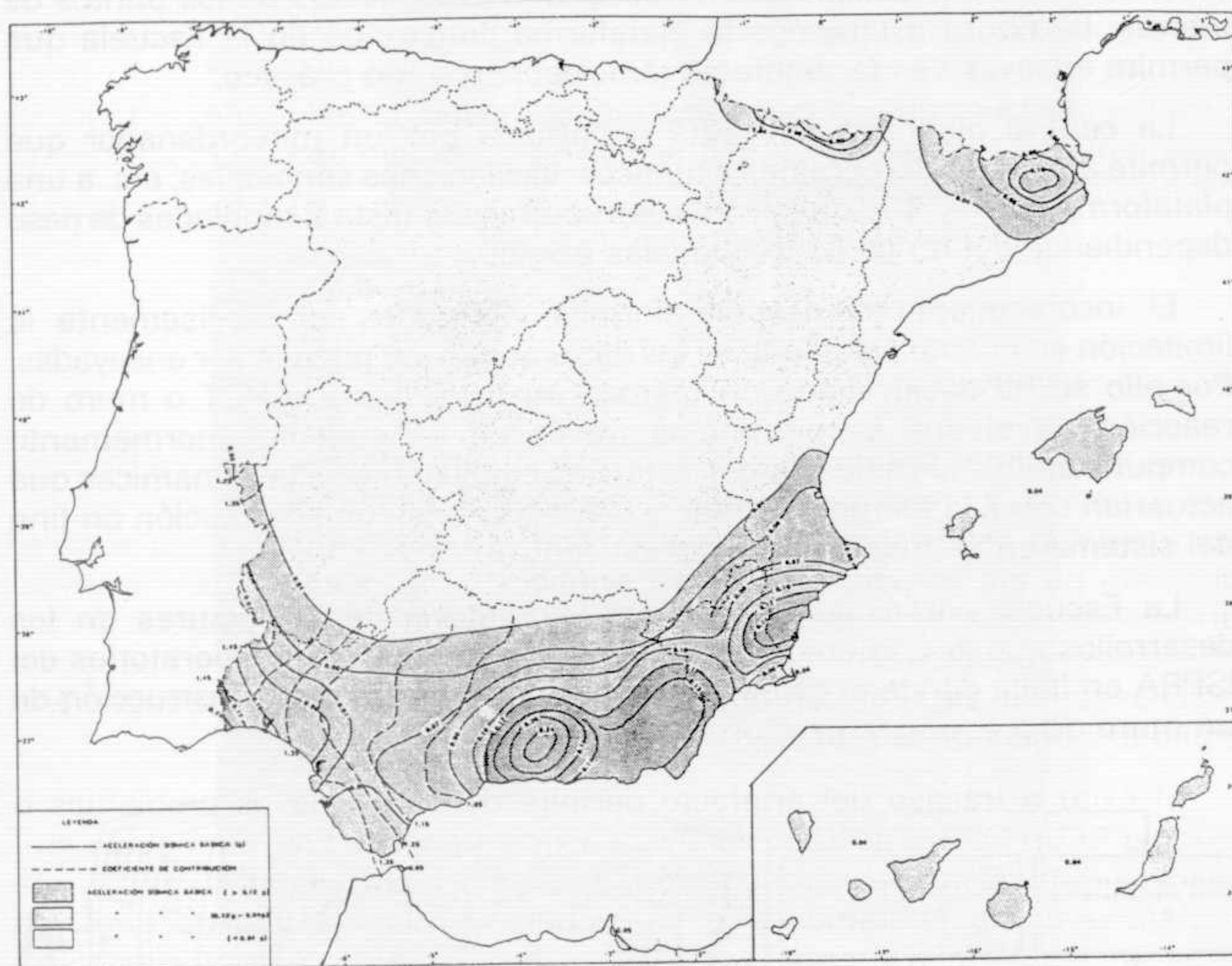


FIGURA 6.1

La figura 6.1 recoge el mapa que propondrá la nueva Norma Española basada en un período de retorno de 500 años y una peligrosidad admitida del 10 % durante una vida media de 50 años.

Acto seguido se escoge un sistema de definición de la acción. Generalmente un espectro elástico como el indicado en la figura 3.2.

A continuación se hacen indicaciones sobre los métodos de cálculo y se proponen formulaciones simplificadas para cierto tipo de estructuras. En el caso de la Norma Española esta aproximación se reserva para edificios con estructuras en las que tanto las masas como las rigideces estén repartidas en forma regular lo que permite suponer que con un solo modo se aproxima bastante bien el comportamiento de la estructura.

Finalmente se dan indicaciones de tipo constructivo y se indica cómo debe combinarse la acción sísmica con el resto de las cargas actuantes sobre la estructura.

El esquema es similar en otros campos como presas, puentes, centrales nucleares, etc. Este último caso ha sido el motor en nuestro país de los estudios sísmicos y la Sociedad Nuclear Española ha preparado unas Recomendaciones que reúnen la experiencia adquirida en los años anteriores, experiencia que debe ser actualizada periódicamente ante la rapidez en la evolución de los conocimientos.

7. Conclusiones

En las páginas anteriores se ha tomado el tema de la Ingeniería Sísmica como ejemplo y pretexto para mostrar la actitud del ingeniero: *observación, comprensión, reflexión y generalización* son virtudes comunes en el establecimiento de los paradigmas tanto científicos como técnicos. El ingeniero arranca de ellos pero debe prolongar su actividad en la elaboración de artefactos que aprovechen las leyes establecidas para extraer un beneficio o conseguir un fin. Por eso el premio Nobel Simon habla de la ingeniería como la *ciencia de lo artificial*.

El éxito o fracaso del artefacto permite detectar nuevos problemas o establecer un Código de buena práctica al que atenerse. Este equilibrio entre práctica profesional e investigación de nuevas posibilidades es el que mantiene activa la llama de esta Escuela y mide la vitalidad de una especialidad. Si falla la creatividad se cae en la rutina y la obsolescencia, si falta la aplicación profesional se cae en el aislamiento.

En cualquiera de los casos se pierde la competitividad, el mercado y, en definitiva, las señas de identidad de la profesión.

A partir de ahora estáis obligados a contribuir con vuestro esfuerzo a esta labor común de mejora de nuestra ingeniería.

En esta Casa se os ha hecho entrega de una serie de conocimientos pero, sobre todo, de una filosofía de actuación basada en el trabajo sistemático, en la aplicación de los principios de la ciencia positiva y en la toma de decisiones.

En resumidas cuentas, se os ha intentado inculcar que, según la divisa de Stevin (figura 7.1), las cosas son *maravillosas pero no incomprensibles* y que eso es un reto para vuestra creatividad e inteligencia.

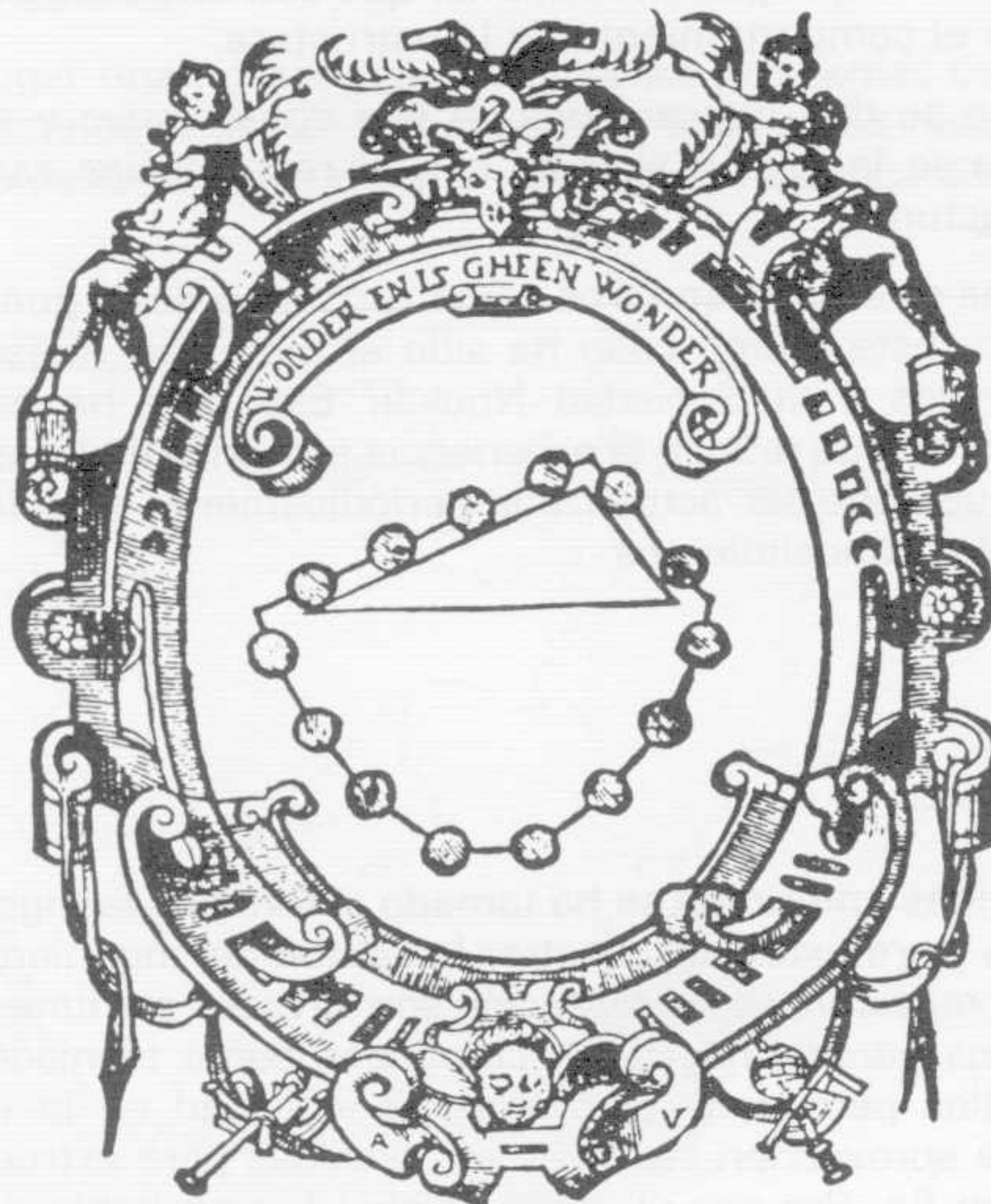


FIGURA 7.1

De hecho ya lo aceptásteis al entrar en esta Escuela y hoy es el momento merecido de la recogida de laureles.

Sin embargo, a partir de ahora la única satisfacción será la que proporciona la obra bien hecha por lo que se os pide no olvidéis que el desafío sigue en pie y que, como decía D'Ors, *sólo es noble quien se exige y hombre quien cada día renueva su entusiasmo*.